UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
VALPARAISO – CHILE

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA ETAPA CRITICA DEL PROCESO DE SECADO DE HOJA DE CELULOSA”

PABLO ANDRES MONSALVE JUSTILLO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: MG. ING. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER.

PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. PEDRO SARIEGO PASTEN.

AGOSTO – 2020

RESUMEN

La metodología utilizada para el diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad posee de manera intrínseca los conceptos asociados a la mejora continua, planear, hacer, verificar y actuar, siendo a su vez una de las herramientas angulares de la gestión integral del mantenimiento.

El secado de hoja de celulosa en el Área Máquina, en la empresa Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Arauco, es una de las etapas en la producción de celulosa que determina la capacidad del proceso, por lo que la disponibilidad de sus equipos es fundamental para la producción de la Planta.

Debido a esto, la Superintendencia de Confiabilidad determinó diseñar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la etapa de secado de hoja de celulosa, con el objetivo de aumentar la confiabilidad y mantenibilidad de los activos del proceso, por consiguiente, su disponibilidad.

Ahora bien, como lo recursos son escasos es necesario definir los límites del presente trabajo en función del contexto propio de ARAUCO, para lo cual se establecieron parámetros que permitan priorizar los equipos y utilizar los recursos en los componentes que retribuyan mayor beneficio a la empresa.

Establecidos los equipos a analizar, se desarrolló la metodología RCM expuesta por la Norma SAE JA1012 [4], donde se obtuvo una estrategia de mantenimiento definida para cada activo, compuesta por tipo de mantenimiento, frecuencia y responsable.

A estas estrategias también se asociaron los documentos y registros necesarios para controlar la calidad en la ejecución de dichas tareas de mantenimiento según el formato establecido por ARAUCO, para luego alinear la oportunidad de ejecución en función de la macro estrategia de mantenimiento utilizada por la empresa.

Finalmente, se crearon los planes de mantenimiento en el software de planificación de recursos empresariales (ERP) SAP PM, en él se adjuntaron los documentos generados, para luego programar la generación de ordenes de trabajo de las tareas de mantenimiento establecidas por el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.

ABSTRACT

The methodology used for the design of a reliability-centered maintenance plan involves intrinsically the concepts associated with continuous improvement, planning, doing, verifying and acting, being at the same time one of the key tools of the integral management of maintenance.

The drying of cellulose sheet from the Machine Area, at Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Arauco, is one of the stages in the production of cellulose that determines the capacity of the process, so the availability of its equipment is fundamental for the production of the Plant.

Due to this, the Superintendence of Reliability determined to design a maintenance plan focused on the reliability of the drying stage of cellulose sheet, with the aim of increasing the reliability and maintainability of the process assets, therefore, their availability.

However, as resources are scarce, it is necessary to define the limits of this work according to ARAUCO's own context, for which parameters were established to prioritise equipment and use the resources in the components that provide the greatest benefit to the company.

Once the equipment to be analysed had been established, the CRM methodology set out in Standard SAE JA1012 [4] was developed, obtaining a maintenance strategy defined for each asset, consisting of the type of maintenance, frequency and person responsible.

These strategies were also associated with the documents necessary to control the quality of maintenance tasks according to the format established by ARAUCO, and then aligned the opportunity for execution according to the maintenance macro strategy used by the Arauco Plant.

Finally, the maintenance plans were created in the SAP PM ERP and the generated documents were attached, to then schedule the generation of work orders for the maintenance tasks established by the reliability-centered maintenance plan.

GLOSARIO

ADt: Tonelada seca al aire (por sus siglas en inglés) con un contenido de materia seca del 90[%].

Celulosa: Polisacárido estructural de células vegetales, compone el 40[%] de la pared celular y es el constituyente principal del papel.

Lignina: Sustancia biológica que se encuentra en tejidos leñosos de los vegetales y que mantiene unidas las fibras de celulosa, compone un 25[%] de la madera.

Pulpa: Suspensión acuosa de fibras de origen vegetal, obtenidas por procedimientos mecánicos, químicos o combinación de ambos.

Secadora de celulosa: Secadora de hoja de pulpa de celulosa mediante sistema aerotransportado, por un colchón de aire caliente.

SIPRO: Superintendencia de Producción.

PGP: Parada General de Planta, detención de producción anual con duración de tres semanas, aproximadamente, en donde se realizan trabajos de mantenimiento de mayor complejidad y que requieren personal externo en su desarrollo.

PA: Parada de Área, detención de producción cada tres meses con duración de uno a tres días, en donde se realiza el trabajo de mantención de Cambio de Paño de Prensas de Área Máquina, donde además las distintas áreas de mantenimiento programan sus trabajos que requieren la detención de equipos.

RCM: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

MTBF: Tiempo medio entre fallas (por sus siglas en ingles).

MTTF: Tiempo medio de reparación (por sus siglas en inglés).

FMECA: Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (por sus siglas en ingles).

RPN: Numero prioritario de riesgo (por sus siglas en ingles).

ERP SAP: Software de planificación de recursos empresariales.

SAP PM: Modulo de mantenimiento de planta del software SAP.

ÍNDICE

RESUMEN i

ABSTRACT i

GLOSARIO i

INDICE DE FIGURAS i

INDICE DE TABLAS i

INDICE DE GRAFICOS i

INTRODUCCION i

OBJETIVOS i

1. Marco Teórico 2

1.1. Gestión del Mantenimiento 2

1.1.1. Evolución del Mantenimiento hacia la Confiabilidad 2

1.1.2. Disponibilidad de Activos 5

1.1.3. Confiabilidad Operacional 8

1.1.3.1. Confiabilidad de Activos 10

1.2. Costo integral de un plan de mantenimiento. 12

1.1. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad 13

1.1. Metodología RCM 15

1.1.1. Priorización de activos a analizar 17

1.1.1.1. Principio de Pareto 17

1.1.1.2. Diagrama de Jack-Knife 19

1.1.2. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad 23

1.1.2.1. Hoja de análisis RCM 25
1.1.2.2. Análisis de criticidad de los efectos de los modos de falla 27
1.1.2.2.1. Curva e intervalo P-F 30
1.1.2.3. Hoja de Resultados RCM 32
1.1.2.3.1. Diagrama de decisión de estrategias de mantenimiento 33
1.2. Software de planificación de recursos empresariales 37
2. Descripción de empresa y su contexto 41
2.1. Plan estratégico de ARAUCO 41
2.1.1. Visión 42
2.1.2. Valores 42
2.2. Política de Medio Ambiente, Calidad, Seguridad y Salud Ocupacional. 42
2.3. Identificación de la Entidad 43
2.4. Reseña histórica 44
2.5. Sector Industrial 45
2.5.1. Industria y negocio forestal 46
2.5.2. Industria y negocio de celulosa. 47
2.5.2.1. La Celulosa 47
2.5.2.2. Mercado de la Celulosa 49
2.5.3. Otras industrias y/o negocios de la empresa. 50
2.6. Planta Horcones 51
2.6.1. Ubicación y accesos 51
2.6.1.1. Organigrama Administrativo 52
2.6.1.2. Organigrama de Complejo Horcones 53

2.6.2. Estructura de proceso productivo 57

2.6.2.1. Área Maquina 61

2.6.2.1.1. Extremo Húmedo 61

2.6.2.1.2. Extremo Seco 65

3. Secado de hoja de celulosa 67

3.1. Antecedentes generales de la etapa de secado de hoja de celulosa 70

3.1.1. Secadora Fläkt modelo FCLC C-7219 72

3.1.2. Rodillos de Retorno 75

3.1.2.1. Embrague de levas 76
3.1.2.2. Polea de cinta de enhebrado 77
3.1.2.3. Accionamiento rodillos de retorno 77

3.1.3. Dispositivo de entrada a la secadora 79

3.1.4. Sistema de cinta de enhebrado 81

3.1.5. Sistema de cajas sopladoras y recirculación de aire 82

3.1.6. Sistema de extracción de aire y recuperación de calor 85

3.1.7. Sistema de vapor y condensado 87

3.1.8. Sistema repulpador de hoja de celulosa 89

4. Plan de mantenimiento actual 90

5. Gestión estratégica de Superintendencia de Confiabilidad 92

5.1. RCM optimizado Área Máquina 94

6. Análisis del historial de fallas de la etapa de secado 96

6.1. Recopilación de avisos desde software ERP 97

6.2. Análisis de historial de fallas de la Secadora 98

6.2.1. Desarrollo principio de Pareto 99

6.2.2. Desarrollo de diagrama Jack-Knife 104

6.3. Conclusión del análisis de historial de fallas 107

7. Determinación de equipos estudiados en el plan RCM 107

8. Análisis de los modos de falla, efecto y criticidad de los componentes seleccionados 108

8.1. Confección de Hoja de Análisis 108

8.1.1. Consecuencias de estados de falla 111

8.2. Análisis de riesgo y aplicación de lógica de decisión RCM 112

9. Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la etapa de secado de hoja de celulosa 115

10. Propuesta de implementación de plan de mantenimiento 116

10.1. Generación de documentos 119

10.1.1. Rutas de mantenimiento de alta frecuencia 119

10.1.1.1. Planes de mantenimiento de baja frecuencia 123

10.2. Plan maestro de mantenimiento 127

10.3. Incorporación de plan maestro de mantenimiento a ERP SAP PM 128

10.3.1. Creación de planes 128

10.3.2. Lanzamiento de planes 130

CONCLUSIONES 133

REFERENCIAS 135

ANEXOS 139

Anexo A: Fallas funcionales y sus respectivos modos de fallas de los Rodillos de Retorno. 139

Anexo B: Consecuencia de los modos de falla y la estrategia de mantenimiento determinada según el diagrama de decisión. 142

Anexo C: Paquetización de las tareas de mantenimiento en función de la “Cabecera de Orden de Trabajo”. 145

Anexo D: Plan maestro de mantenimiento del Área Mantención Mecánica de la etapa de secado. 148

INDICE DE FIGURAS

Figura 2. Esquema de pilares y cimientos de la Disponibilidad 6

Figura 3. Diagrama de decisión de políticas de mantenimiento para fallas funcionales evidentes (Fuente: SAE JA1012:2002 [4]). 35

Figura 4. Diagrama de decisión de políticas de mantenimiento para fallas funcionales ocultas (Fuente: SAE JA1012:2002 [4]). 36

Figura 5. Representación de Ubicación Técnica, Equipos y TAG. 38

Figura 6. Modelo de gestión de mantención Celulosa Arauco. 39

Figura 7. Logo de Celulosa Arauco y Constitución S.A (Fuente: Memoria anual ARAUCO [6]). 41

Figura 8. Accionistas mayoritarios de Celulosa Arauco y Constitución S.A. 44

Figura 9. Áreas de Negocio en las cuales se desarrolla ARAUCO (Fuente: Presentación Roadshow ARAUCO, Octubre 2018 [29]). 46

Figura 10. Reproducción ilustrada de los componentes de la pared celular. Fibras de celulosa (prisma curvo hexagonal), lignina (incrustaciones esféricas irregulares) y hemicelulosa (hebras heterogéneas). (Fuente: Thomas Splettstoesser [27].) 48

Figura 11. Reproducción ilustrativa de pared celular atacada químicamente. Fibras de celulosa dispersas y menor presencia de lignina (Fuente: Thomas Splettstoesser [27]). 49

Figura 12. Distribución de Áreas Productivas y Accesos del Complejo Horcones. (Fuente: Google Maps, 2019) 52

Figura 13. Organigrama Complejo Celulosa Arauco, Horcones. 54

Figura 14. Organigrama Superintendencia de Confiabilidad. 55

Figura 15. Organigrama Superintendencia de Mantenimiento Fibra, Madera y Maquina 56

Figura 16. Organigrama Superintendencia de Maquina 56

Figura 17. Diagrama de flujo productivo de celulosa con proceso Kraft [15]. 59

Figura 18. Extremo Húmedo del Área máquina. (Fuente: Valmet [11].) 62

Figura 19. Cajón de Alimentación “Headbox” (Fuente: Valmet [11]) 63

Figura 20. Fourdrinier (Fuente: Valmet [11]) 64

Figura 21. Etapa de prensas (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]). 64

Figura 22. Secadora de hoja de celulosa (Fuente: Valmet [11]) 65

Figura 23. Cortadora de celulosa en líneas finales (Fuente: Andritz [10]). 66

Figura 24. Líneas finales del Área Maquina, prensa de fardos y unitizador (Fuente: Valmet [11]). 66

Figura 25 Aumento de consistencia de la celulosa debido al agua drenada por la tela filtrante del Fourdrinier (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]). 68

Figura 26 Diagrama de flujo de sistema de vacío 68

Figura 27. Extracción de agua de la hoja de celulosa mediante compresión mecánica (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]). 69

Figura 28 Secadora de hoja de celulosa. Imagen referencial (Fuente: Valmet [12]). . 71

Figura 29. Secadora de hoja de celulosa. Imagen referencial (Fuente: Andritz [10]). 74

Figura 30. Rodillo de Retorno (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 75

Figura 31. Piezas y componentes principales de un embrague de levas (Fuente: Tsubaki cam clutches: Ruedas libres [9]). 76

Figura 32. Funcionamiento embrague de levas (Fuente: Tsubaki cam clutches: Ruedas libres [9]). 77

Figura 33. Accionamiento Rodillos de Retorno de Salida (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 78

Figura 34. Accionamiento Rodillos de Retorno de Entrada (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 79

Figura 35. Dispositivo de entrada a la Secadora (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 79

Figura 36. Unidad de accionamiento neumático y celda de carga de dispositivo de entrada a la secadora (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 80

Figura 37. Celdas de carga para medir condiciones reales de operación (Fuente: ABB [30]). 81

Figura 38. Sistema de enhebrado de hoja de celulosa en la secadora (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 81

Figura 39. Poleas desplegadoras de cinta de enhebrado (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 82

Figura 40. Recirculación de aire y Cajas sopladoras (Fuente: Fläkt Dryer, Andritz [10]). 83

Figura 41. Ventilador de Recirculación (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 84

Figura 42. Esquema de sistema de levante de cajas sopladoras (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 85

Figura 48 Sistema de complementario de suministro de aire en la secadora (Fuente: Mantención Mecánica: Secadora de Pulpa [8]). 86

Figura 44. Flujo de aire al exterior de la secadora (Fuente: Fläkt Dryer Andritz, 2011 [10]). 87

Figura 45. Diagrama de una unidad de intercambiador de calor de serpentines con vapor 88

Figura 46. Estanque colector de condensado (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]). 89

Figura 47, Repulpador de hoja de celulosa (Fuente: Archivo técnico, Celulosa Arauco y Constitución S.A.) 90

Figura 48. Modelo de gestión de mantención Celulosa Arauco (Fuente: Superintendencia de Confiabilidad ARAUCO [18]). 93

Figura 49. Transacción en ERP – SAP PM [21]. 97

Figura 50. Selección de filtros al generar reporte de avisos en SAP PM [21]. 97

Figura 51. Extracto de visualización de ubicaciones técnicas seleccionadas en SAP PM [21] 98

Figura 52. Extracto de reporte de avisos obtenido de SAP PM [21]. 98

Figura 58. Categoría evaluada según taxonomía descrita en ISO 14224. Nivel 5, 6 y 8 respectivamente [1]. 99

Figura 54. Hoja de Ruta en SAP PM correspondiente a inspección de estanque con vapor según DS10 cada 3 años [21]. 129

Figura 55. Plan de mantenimiento preventivo en SAP PM, para certificación de estanque de vapor [21]. 130

Figura 56. Parametrización de la programación de un plan de mantenimiento en SAP PM [21]. 131

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de cantidad de fallas por equipos y su frecuencia acumulada. 18

Tabla 2. Tiempo medio de reparación de fallas. 21

Tabla 3. Límites del Diagrama de Jack-Knife. 21

Tabla 4. Curvas de iso-indisponibilidad..... 22

Tabla 5. Ponderaciones relativas de severidad de las fallas cuando ocurren según Celulosa Arauco. 28

Tabla 6. Ponderaciones relativas de probabilidad de ocurrencia de falla según Celulosa Arauco. 29

Tabla 7. Ponderaciones relativas de la probabilidad de detectar la falla antes de que ocurra según Celulosa Arauco. 30

Tabla 8. Categorías de las consecuencias de los modos de falla. 34

Tabla 9. Características diferenciadoras de la celulosa..... 49

Tabla 10. Producción de celulosa esperada para el año 2019 (Fuente: SIPRO Arauco [28])..... 57

Tabla 11. Agua evaporada desde la hoja de pulpa de celulosa en la secadora. 69

Tabla 12. Datos técnicos de operación de la etapa de secado de hoja de celulosa. 72

Tabla 13. MTTR y MTBF del Área Máquina. (Fuente: Superintendencia de Confiabilidad ARAUCO)..... 95

Tabla 14. Análisis de cantidad de fallas relativas para cada sistema. 99

Tabla 15. Análisis de cantidad de falla relativa para cada clase de equipo. 101

Tabla 16. Análisis de cantidad de fallas relativas para cada ítem mantenible. 102

Tabla 17. Componentes de la Secadora para analizar, según Principio de Pareto.... 104

Tabla 18. MTTR de las clases de equipos en función de la cantidad de fallas y tiempo de reparación. 105

Tabla 19. Clase de equipos en la secadora ordenados de manera descendente en función de la indisponibilidad que generan. 106

Tabla 20. Activos de la etapa de secado de hoja que serán analizados en el proceso RCM. 108

Tabla 21. Hoja de Análisis que responde las dos primeras preguntas de la metodología RCM. 109

Tabla 22. Ejemplo de uso de la estrategia del ¿Por qué? ¿Por qué? Para determinar causa raíz de los modos de falla. 110

Tabla 23. Equipos con ubicación técnica única y la cantidad de estos equipos que se encuentran en la etapa de secado, con la contabilización de la cantidad de sus modos de falla. 110

Tabla 24. Resumen del análisis que determina si un estado de falla es Evidente u Oculto. 112

Tabla 25. Resumen de la distribución en las consecuencias de los modos de falla. . 114

Tabla 26. Tipo de mantenimiento a priori para cada modo de falla, según el tipo de consecuencias y su RPN. 114

Tabla 27. Distribución de tareas propuestas según tipos de mantenimiento. 116

Tabla 28. Segmentación de tareas de mantenimiento según responsable, tipo de mantenimiento y frecuencia. 117

Tabla 29. Distribución de Rutas y Planes de mantenimiento en las distintas áreas responsables. 119

Tabla 30. Pauta de Ruta de Mantenimiento según formato ARAUCO, para una ruta de inspección mecánica semanal a los equipos críticos de la etapa de secado. 121

Tabla 31. Hoja de Trabajo Estándar según formato ARAUCO, para la inspección mecánica de reductores en ruta. 122

Tabla 32. Pauta de Trabajo de Mantenimiento según formato ARAUCO, para un cambio de embrague de los rodillos de retorno de la secadora. 124

Tabla 33. Lista de Control de Recepción según formato ARAUCO, para un cambio de motor eléctrico. 125

Tabla 34. Índice de Especificaciones Técnicas según formato ARAUCO, para una mantención regulatoria de estanques de vapor según Decreto Supremo 10. 126

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Visión de tradicional de la tasa de fallas, donde esta aumenta al finalizar la vida útil del activo. En la cual se basa el Mantenimiento Preventivo (Fuente: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Jonh Moubray [24]). 3

Gráfico 2. Patrones de falla más comunes en la industria aeroespacial según el MSG (Fuente: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Jonh Moubray [24]). 4

Gráfico 3. Curva característica de la variación en el gasto integral de mantenimiento. 13

Gráfico 4. Diagrama de Pareto por Cantidad de Fallas. 19

Gráfico 5. Diagrama de Jack-Knife con sus determinas zonas. 22

Gráfico 6. Curva P-F. Relación cualitativa entre métodos de inspección e intervalo P-F. 32

Gráfico 7. Costo especifico de extraer el agua de la hoja de celulosa, por el kilogramo de agua retirado en relación cualitativa con el porcentaje de secado (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]). 70

Gráfico 8. Diagrama de Pareto. Cantidad de fallas en los sistemas principales. 100

Gráfico 9. Diagrama de Pareto. Cantidad de Fallas de Clases de Equipos. 102

Gráfico 10. Diagrama de Pareto. Cantidad de fallas en ítems mantenibles. 103

Gráfico 11. Diagrama de Jack-Knife. Cantidad de fallas y MTTR de clases de equipos en la secadora. 106

INTRODUCCION

Cualquier decisión tomada respecto a un activo que pertenece a un sistema productivo tendrá tarde o temprano una repercusión en su desempeño, de ahí la importancia de la estrategia que es utilizada para definir sus actividades de mantenimiento.

Una industria de envergadura mundial, como lo es Celulosa Arauco y Constitución, debe poseer en sus procesos un espíritu enfocado en la mejora continua, más aun, alinear este espíritu con el plan estratégico de la empresa. Ya que el constante desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas y metodologías de gestión aumentan la brecha existente entre la compañía y los benchmarking internacionales.

ARAUCO maneja un sistema de economía a escala, en donde, cuando mayor es la producción, menor es el coste unitario del producto, por lo que ha impulsado un crecimiento horizontal y vertical en el negocio forestal, convirtiéndose en uno de los principales productores mundiales de celulosa.

Para lograr este nivel óptimo de producción es necesaria una elevada inversión en el patrimonio industrial de la empresa, es decir, en activos fijos, maquinarias y equipos, de los cuales se desea obtener el mayor beneficio posible durante su vida útil, para lo que sin duda es relevante lograr una elevada confiabilidad operacional.

La industria aeronáutica de Estados Unidos ha desarrollado desde 1960 y actualizado hasta el día de hoy, una estrategia de mantenimiento estructurada, deductiva y participativa, llamada mantenimiento centrado en confiabilidad. Esta estrategia se basa en diseñar un plan de mantenimiento que vela por que los equipos continúen haciendo lo que se espera de ellos durante un tiempo determinado, considerando estándares de seguridad, calidad y productividad.

El plan de mantenimiento centrado en confiabilidad ha dado desde sus comienzos enormes beneficios a diversas industrias, por lo que ha sido una metodología constante y un pilar fundamental en la búsqueda de la mejora continua de los procesos.

Al aplicar esta estrategia en la empresa, se espera aumentar la confiabilidad operacional del Área Máquina, con un enfoque en la confiabilidad de sus activos críticos, de modo tal, que por consiguiente se aumente la disponibilidad de estos. A la vez, se dará énfasis en reducir los riesgos asociados a la seguridad y medio ambiente.

La actual memoria describe el desarrollo de esta estrategia en la etapa de secado de hoja de celulosa, y, además, la implementación del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.

OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo general diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad del proceso de secado de hoja de celulosa, para ser implementado en la empresa Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Arauco.

Por ende, los objetivos específicos contemplados son:

- Evaluar plan de mantenimiento actual de la etapa de secado de hoja de celulosa, determinando casos de éxito y oportunidades de mejora.
- Identificar equipos críticos del proceso, en cuestión de seguridad, daño al medio ambiente, enfocándose en reducir riesgo de accidentes y satisfacer normas, leyes y reglamentaciones vigentes.
- Mejorar el flujo de información de las áreas involucradas en el mantenimiento, creando un lenguaje común entre estas y aumentar el conocimiento general de los sistemas analizados.
- Reestructurar plan actual de mantenimiento e incorporar las acciones determinadas por el proceso RCM al sistema ERP de la empresa.

1. Marco Teórico

1.1. Gestión del Mantenimiento

El mantenimiento tiene como objetivo preservar los activos, de manera tal, que continúen realizando las funciones que se esperan de ellos. Todo esto, delimitado por un sector productivo, cumpliendo estándares de calidad y seguridad.

Ahora bien, la mantención maneja parámetros relativos, no absolutos. Esta hipótesis proviene del hecho de que todos los sistemas son influenciados por su entorno de funcionamiento, y los requerimientos que subyacen a cada uno de los equipos estarán determinados por aquel contexto. Mas aun, la estrategia de mantenimiento y la determinación de acciones relativas a este deben estar en concordancia con la misión, visión y objetivos de la empresa.

1.1.1. Evolución del Mantenimiento hacia la Confiabilidad

El mantenimiento ha ido evolucionando con el paso del tiempo, en el siglo XX el consumo y demanda de productos era menor comparada con los niveles actuales, a su vez, las maquinas trabajaban sobredimensionadas por lo que la estrategia utilizada era el **mantenimiento correctivo**, es decir, se reparaban las averías o fallas funcionales a medida que sucedían. Cabe señalar que, debido a las condiciones de producción descritas, los costos económicos percibidos por las pérdidas de productividad no eran considerables comparados con los de una estrategia de mantenimiento más elaborada, sin embargo, los daños ambientales o accidentes laborales eran de gran impacto y asumidos por las comunidades y trabajadores.

A partir de 1950 la demanda global aumento de manera radical, ya no era posible utilizar tiempos muertos de producción para realizar las actividades de mantenimiento, cada detención significaba grandes pérdidas económicas a la empresa. Era necesario producir en cada momento.

Comenzó la primera evolución del mantenimiento, donde se cimento la idea de que había que anticiparse a las fallas y estas debían ser evitadas. Las industrias establecieron entes especializados en reparaciones, encargados de corregir averías una vez ocurridas e intentar prevenirlas. Con el tiempo se dieron cuenta que una vez avanzada la vida útil del equipo comenzaba a aumentar su frecuencia de falla, la cual era compartida entre los mismos componentes. De modo, que el **mantenimiento preventivo** comenzó a ser una práctica habitual en la década del '50, realizando cambios de equipos a intervalos fijos, calibraciones, tareas de recuperación e inspección.

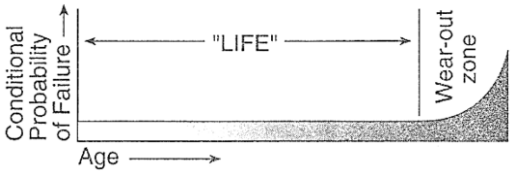


Gráfico 1. Visión de tradicional de la tasa de fallas, donde esta aumenta al finalizar la vida útil del activo. En la cual se basa el Mantenimiento Preventivo (Fuente: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Jonh Moubray [24]).

Ahora bien, fue en 1960 cuando la industria aeronáutica de Estados Unidos designo un grupo directivo de mantenimiento (MSG, por sus siglas en inglés), el cual público un método estructurado, deductivo y participativo que establece la estrategia de mantenimiento más adecuada para un activo considerando su contexto. Con enfoque en asegurar que el equipo continúe haciendo lo que el usuario quiere haga, es decir, aumentar su confiabilidad. Donde se acuño el termino **mantenimiento centrado en confiabilidad**.

Primero se analizó la manera en que fallan los distintos componentes y luego la probabilidad de que estas fallas ocurran en función del tiempo de operación del activo, a partir de este estudio se generaron los perfiles de falla de los diferentes componentes y se determinó lo siguiente:

Solo 4[%] de los componentes considerados poseían una etapa de desgaste, la cual aumenta su tasa de falla por envejecimiento al finalizar su etapa de vida útil, como indican los modelos A y B en la curva el final del perfil de falla.

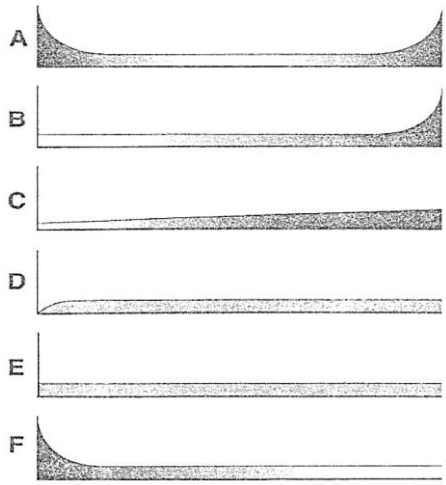


Gráfico 2. Patrones de falla más comunes en la industria aeroespacial según el MSG (Fuente: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Jonh Moubray [24]).

A su vez, al patrón C correspondieron un 5[%], al D un 7[%], al E un 14[%] y al F un 68[%].

Es decir, un 70[%]de los equipos, que pertenecen al patrón A y F, presentaron una etapa llamada “fase de mortalidad infantil” en donde se infiere que una alta densidad de tareas de cambio cíclicos y mantenimiento preventivo tiene poco impacto en aumentar la confiabilidad, más aun, introducen mortalidad infantil a sistemas estables.

Con estos resultados el grupo directivo publico una segunda versión de su método, en 1970, en donde presento un “Árbol de Decisiones”, mediante el cual se podía determinar el tipo de mantenimiento más adecuado según el contexto, modos de falla y riesgo tolerado, llamado MSG-2, donde además se consolido el concepto de mantenimiento basado en condición del activo.

Finalmente, en 1980 se publicó una última versión, que consideraba un enfoque en las consecuencias de las fallas, de seguridad o económica y establece criterios para determinar cuan tolerables son los riesgos de los daños causados por los fracasos. Esta última publicación ha sido recibido enmiendas periódicas, la última en 2015, sin embargo, aún no se ha emitido su cuarta versión.

1.1.2. Disponibilidad de Activos

Se suele decir que el mantenimiento debe garantizar la disponibilidad, y esto está en lo cierto, pero es necesario realizar algunos alcances.

Lo que se espera de un activo es que realice las funciones para la cual se dispone de él, de manera que no se vea afectado o interrumpido el proceso productivo. En otras palabras, el mantenimiento debe garantizar la disponibilidad de las funciones, las cuales son relativas al contexto, y no enfocarse en la disponibilidad del equipo. Si no consideramos el contexto, estamos hablando de un mantenimiento absoluto que no estaría alineado con los objetivos de la empresa. Esto se entiende como Disponibilidad.

Ahora bien, esta ansiada disponibilidad debe ser finita y establecida, bajo la cual se desarrollarán las estrategias de mantención, tipos de actividades y frecuencias. Si se modifica dicho valor, cambiaran también los objetivos de la gestión de mantenimiento, por lo que probablemente también varíen las tareas y frecuencias.

La disponibilidad se sostiene sobre dos pilares imprescindibles, la confiabilidad y mantenibilidad, estos a su vez avalan su firmeza en una gestión del mantenimiento vigoroso e idóneo que utiliza de manera eficiente y eficaz lo recursos con los que dispone.

Figura 1. Esquema de pilares y cimientos de la Disponibilidad

Por consiguiente, se definen tres grados de disponibilidad, según H. Paul Barringer, Consultor Senior de Confiabilidad en Barringer & Associates, definición que a su vez fue adoptada por la DAU, Defense Acquisition University del Departamento de Defensa de Estados Unidos [25]:

Disponibilidad Técnica o Inherente (Di), expresa la disponibilidad tal como la observa el personal de mantenimiento, no considera tiempo perdidos por mantenciones programadas ni perdidas operacionales, se define según:

$$Di = 1 - \frac{T_{MC}}{T_o} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

(Fórmula 1)

Donde:

T_{MC}: Tiempo de mantenimiento correctivo no programado.

T_o: Tiempo disponible para operar.

MTBF: Tiempo promedio entre dos fallas (por sus siglas en inglés, meantime between failures), de equipos reparables.

$$MTBF = \frac{T_o - T_{MC}}{Cantidad\ de\ fallas\ en\ tiempo\ de\ operacion}$$

(Fórmula 2)

MTTR: Tiempo promedio para reparación (por sus siglas en inglés, meantime to repair).

$$MTTR = \frac{T_{MC}}{Cantidad\ de\ reparaciones}$$

(Fórmula 3)

Disponibilidad Lograda (Dl), considera como perdidas de disponibilidad el mantenimiento correctivo y planificado, sin embargo, no toma en cuenta perdidas en la producción por demoras de suministros o administrativas.

$$Dl = 1 - \frac{T_{MC} + T_{MP}}{T_o}$$

(Fórmula 4)

Donde:

T_{MP}: Tiempo por mantenimiento planificado.

Disponibilidad Operacional (Do), es la disponibilidad desde el punto de vista del usuario, bajo la cual se realizan estimaciones de producción y análisis de costos, considera todas las detenciones indistintas del motivo.

$$Do = 1 - \frac{T_{MC} + T_{MP} + T_{PO}}{T_o}$$

(Fórmula 5)

Donde:

T_{PO}: Tiempo por perdidas operacionales, es decir, demoras en suministros, falencias administrativas, reprocesos, etc.

1.1.3. Confiabilidad Operacional

ARAUCO tiene como plan estratégico ser una empresa sustentable y de calidad en todas sus áreas, para lograr esto es necesario contar con operaciones confiables y seguras, es decir poseer confiabilidad operacional.

Una gestión enfocada en la confiabilidad operacional permite un control eficaz de lo riesgos laborales, cabal cumplimiento de la legislación, mejoramiento continuo de indicadores de desempeño y en su conjunto, un cumplimiento de los objetivos estratégicos de la empresa.

La confiabilidad operacional reside en cuatro dimensiones, las cuales interactúan entre sí, por lo tanto, la modificación de una incidirá irremediablemente de manera positiva o negativa en las otras.

- Confiabilidad de Diseño: Es la probabilidad de fallas inherentes que se establecen durante las fases del proyecto a los equipos, sistemas y plantas. Se define como el uso sistemático de criterios y métodos de confiabilidad partiendo desde su diseño, hasta su desincorporación, con el propósito de obtener el nivel de confiabilidad requerida a un óptimo costo a lo largo de su ciclo de vida.

Responsable: Área de Proyectos.

- Confiabilidad Humana: Tiene como propósito disminuir a cero el error humano, esta depende de las competencias y conocimientos de las personas, lo cual se logra mejorando procesos de selección, capacitación, entrenamiento y certificaciones.

Responsable: Alta Dirección.

- Confiabilidad de Procesos: Se busca operar siempre dentro de los parámetros establecidos, y se logra con un entendimiento profundo de los procesos, estableciendo procedimientos y normas de manera transversal en la organización.

Responsable: Área de Operaciones.

- Confiabilidad de Activos: Cada sistema y equipo debe estar en condiciones óptimas de operación, para lo cual debe contar con un plan formal de mantenimiento, con estándares establecidos y revisados de manera periódica con análisis de fallas y consecuencias.

Responsable: Área de Confiabilidad.

- Mantenibilidad: Es un subdimensión de la Confiabilidad de Activos. Existen un conjunto de acciones destinadas a mantener o reacondicionar un componente, equipos o sistema, en un estado en el cual puede realizar sus funciones. Para esto es necesario una adecuada red de insumos, herramientas y repuestos, además disponer de condiciones de calidad para realizar dichas intervenciones, como accesibilidad, logística, aislamiento y entrega de equipos.

Responsable: Área de Mantenimiento.

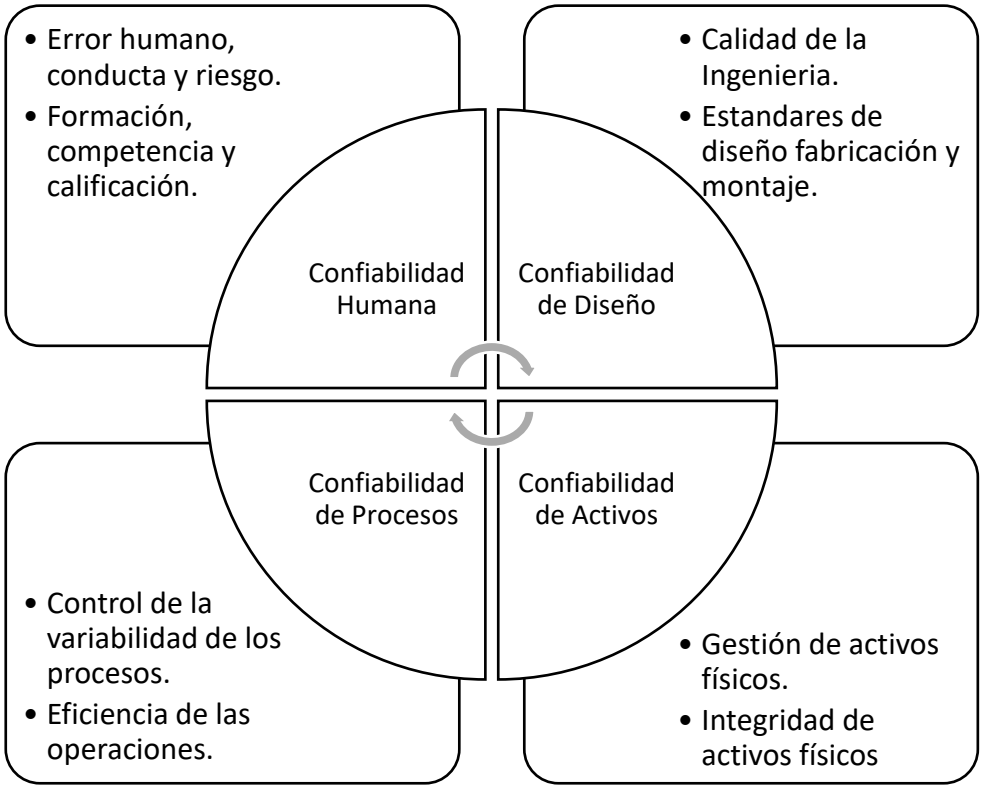


Figura 2. Diagrama de Confiabilidad Operacional (elaboración propia).

1.1.3.1. Confiabilidad de Activos

El primer atributo que garantiza la disponibilidad inherente es la confiabilidad de activos, esta resulta ser un parámetro que asegura el funcionamiento de un componente en un tiempo de utilización. En términos estadísticos, es la probabilidad de que un equipo no falle durante un tiempo determinado y contexto establecido.

Confiabilidad (C) se define según:

$$C(t) = 1 - \int_{t_0}^{t_1} f(t)dt$$

(Fórmula 6)

Donde:

f(t): función de densidad de probabilidad de falla, la cual es la relación entre la variable tiempo (t) y la probabilidad de que ocurra una falla.

Además, si la función densidad de falla se distribuye de manera exponencial, es decir mientras el tiempo transcurre la probabilidad de que suceda una falla aumenta de manera exponencial, esta se expresa de la siguiente manera:

$$f(t) = MTBF \cdot e^{-(t/MTBF)}$$

(Fórmula 7)

Integrando se obtiene:

$$F(t) = \int_{t_0}^{t_1} f(t)dt = 1 - e^{-(t/MTBF)}$$

(Fórmula 8)

Lo cual representa la probabilidad de que ocurra una falla entre el intervalo de tiempo t_0 y t_1, finalmente reemplazándolo en la ecuación de confiabilidad:

$$C(t) = e^{-(t/MTBF)}$$

(Fórmula 9)

La función de densidad de fallos para una ley de distribución exponencial es común en equipos eléctricos, electrónicos y algunos mecánicos, como rodamientos, donde la probabilidad de falla depende de múltiples factores independientes los cuales se combinan y potencian entre sí.

Otro parámetro que sustenta la disponibilidad inherente es la Mantenibilidad. Un equipo o componente que se considera mantenible comprende de la capacidad que posee para ser diagnosticado si se encuentra en estado de falla y también la aptitud de ser reparado en el menor tiempo posible de acuerdo con su complejidad y contexto.

Según esto, a modo de parámetro estadístico, se describe mantenibilidad como la probabilidad que tiene un ítem en estado de falla de ser diagnosticado y reparado con éxito en un tiempo "t".

Mantenibilidad (M) se define según:

$$M(t) = 1 - e^{-(t/MTTR)}$$

(Fórmula 10)

Para equipos en donde el indicador MTTR es constante para cualquier instante t.

Los parámetros descritos, son indicadores claves el momento de evaluar la gestión del mantenimiento y estándares idóneos para establecer objetivos (benchmarking), sin embargo, se deben considerar cualidades intrínsecas el proceso como la mantenibilidad inherente a los equipos desde su etapa de diseño, junto con factores internos a la empresa o externos que los alteran.

1.2. Costo integral de un plan de mantenimiento.

Una empresa que planifica su mantenimiento espera resultados a mediano y a largo plazo, para lo cual gestiona sus recursos de manera tal que obtenga la mejor relación costo-beneficios.

Si no dispone de los recursos necesarios para diseñar un plan de mantenimiento que aumente la confiabilidad de los activos, se generara una sobrecarga de labores correctivas y bajo índice MTBF. Las labores correctivas habitualmente detienen la producción, utilizan recursos extras y tienen poca planificación, por lo que son costosas e inseguras. Esto genera elevados gastos indirectos al mantenimiento.

Por otro lado, una estrategia excesivamente gestionada, con un plan de mantenimiento sobrecargado de actividades proactivas eleva los gastos directos al mantenimiento,

tales como, mano de obra, materiales y servicios complementarios, lo cual deja ser eficiente económicamente.

Ahora bien, una visión integrar del mantenimiento que permita realizar análisis sistémicos del efecto de las acciones de mantenimiento en el negocio hace evidente los beneficios de la gestión en desmedro de lo que la ausencia de esta puede ocasionar. Es de vital importancia alinear la estrategia seleccionada con los objetivos de la empresa y no solo en los objetivos habituales del mantenimiento, tales como, disponibilidad o costos, permitiendo en ocasiones una postura pasiva al respecto.

La relación entre las situaciones descritas se puede representar en un diagrama que expone los gastos en mantenimiento en función de la confiabilidad esperada.

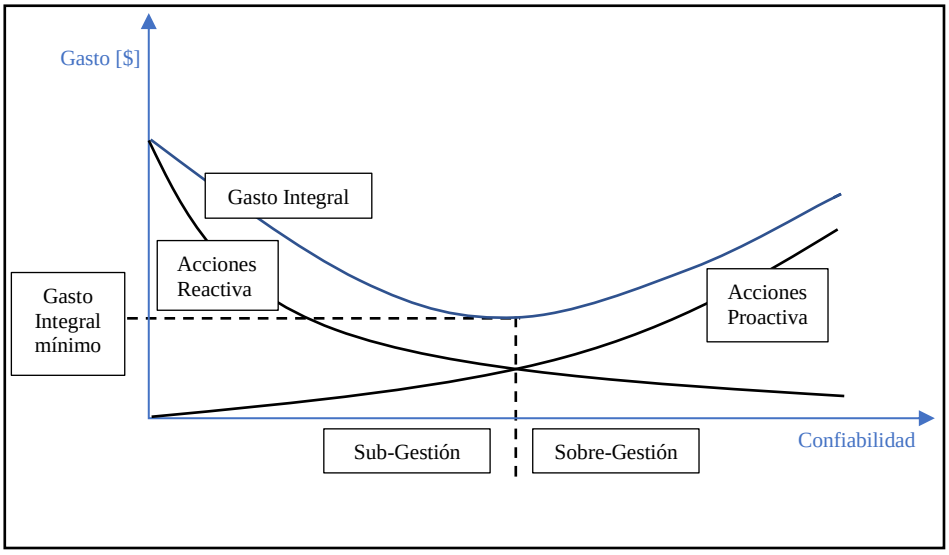


Gráfico 3. Curva característica de la variación en el gasto integral de mantenimiento.

1.1. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

Un proceso sistemático de análisis y decisión puede llamarse RCM solo si satisface las normas internacionales SAE-JA1011 *"Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes"* [3] y SAE-JA1012 *"A Guide to Reliability-Centered*

Maintenance (RCM)" [4]. Norma que se utiliza como referencia en reiteradas oportunidades a lo largo de este informe.

La primera en publicarse fue la norma SAE JA1011, en agosto de 1999, la cual nace en consecuencia de la necesidad internacional por establecer estándares y criterios para que el desarrollo de un programa de mantenimiento pueda catalogarse como RCM. Debido a las variadas versiones que se desarrollaron a partir del nacimiento del término "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad" en 1960.

Si bien esta norma no es un manual o guía del procedimiento a desarrollar, describe los criterios mínimos que debe cumplir una estrategia RCM.

A continuación, en enero del 2002, se emitió su segunda versión, la norma SAE-JA1012. Esta, amplifica y aclara los criterios descritos en su versión anterior, como también resume problemas adicionales que deben ser considerados para aplicar un RCM de manera exitosa.

Un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad tiene como objetivo general la conservación de las funciones del sistema, no obstante, de manera adicional se esperan los siguientes objetivos específicos:

- Optimizar rutinas de mantenimiento, haciendo estrictamente lo necesario
- Reducir riesgo de accidente a "tolerable"
- Cumplir con normativas legales respecto al medio ambiente.
- Aumentar confiabilidad, por consiguiente, la disponibilidad del sistema.
- Mejorar la calidad de productos fabricados o servicios prestados.
- Reducir los gastos totales de la operación, incluido mantenimiento.
- Promover el trabajo en equipo y establecer un lenguaje común en el ámbito de la mantención y la empresa.

1.1. Metodología RCM

Para que un plan de *mantenimiento centrado en confiabilidad* sea exitoso, se deben direccionar los recursos disponibles en pro de los siguientes títulos:

a) Priorizar los activos y establecer objetivos.
b) Planificación.
c) Nivel de análisis y límites de activo.
d) Documentación Técnica.
e) Organización.
f) Entrenamiento.
g) Rol del software computacional.
h) Recolección de datos.
i) Implementación.

En primer lugar, se deben establecer las metas que se pretenden lograr al concluir el proceso, considerar indicadores de desempeño para las áreas en que se esperan mejoras, ya sea de seguridad, productividad, calidad u otras. Luego se seleccionarán los activos a analizar y sus prioridades relativas, considerando que la aplicación del RCM consume recursos extraordinarios en una organización.

Al planificar el proceso, se debe decidir cuales activos se analizaran, cuantificar los objetivos deseados, estimar el tiempo destinado, identificar las habilidades y participantes involucrados, capacitar a los colaboradores en la teoría y práctica del RCM, establecer el espacio y recursos físicos apropiados, decidir por quien y cuando será revisado el análisis, además de donde, cuando y por quien será implementada la estrategia definida, por ultimo instituir que el análisis se actualice de manera periódica.

Es importante definir el nivel de análisis del activo, para cada sistema y objetivos definidos hay un nivel de análisis óptimo. Si se opta por un nivel demasiado alto, se indicarán demasiados modos de falla por función, aumentando la probabilidad de

soslayar modos de fallas relevantes para determinadas funciones. Un análisis a nivel muy bajo requerirá invertir más recursos para identificar todos los modos de fallas y a su vez, será difícil identificar las funciones o estándares de operación asociados a estos. También es relevante asegurar los límites del activo, para evitar que estos elementos de transición no sean considerados.

Previo a comenzar a analizar el sistema, es de vital importancia obtener cualquier documentación disponible que describa los activos en cuestión, ya sea; planos, manuales de operación y mantenimiento, lista de partes y modificaciones. Esta documentación debiese ser suficiente para completar el análisis RCM.

Por parte de la organización, son requeridos los siguientes elementos: persona responsable del cumplimiento de la norma, persona responsable del análisis de los activos definidos, persona que lidere el proceso, persona representante del uso del activo para proveer información o tomar decisiones y recursos físicos y digitales para llevar a cabo el proceso.

Para las personas que controlan la aplicación del proceso, proveen información e implementan los resultados del análisis, de manera usual bastará con un curso formal de mínimo tres días de duración. Sin embargo, para las personas que lideran el proceso es necesario una capacitación extensa que valide todas las habilidades requeridas.

Los recursos digitales, como un software computacional son imprescindible si se analizan un gran número de activos, por otro lado, puede ser útil para clasificar tareas propuestas, asistir con cálculos estadísticos y generar reportes específicos. Sin embargo, si es utilizado de manera incorrecta puede transformar al RCM en un ejercicio mecánico de construcción de una base de datos y no como una búsqueda real de los requerimientos del activo.

Es relevante recopilar un grupo de datos históricos del activo al aplicar RCM, tales como, historial de fallas, historial de desempeño y costos de operación y

mantenimiento, datos del desarrollo del mantenimiento programado, tareas de mantenimiento existentes y consecuencias de fallas históricas. Estos datos suelen ser suministrados por el dueño o usuario del activo, pero también puede ser entregado por los vendedores, fabricantes o usuarios de equipos similares.

Finalmente, las tareas programadas a partir del RCM deben ser descritas con detalle, de modo que asegure su ejecución por cualquier persona de la manera correcta. Estas tareas deben ser paquetizadas en grupos de trabajos realizables, desarrollados por las personas correctas en el momento justo. Lo cual requerirá planificación y programación adecuada.

1.1.1. Priorización de activos a analizar

Cada dueño o usuario de los activos debe seleccionar cuales de estos serán sujetos al análisis, considerando que la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad consume recursos extraordinarios de la organización, tales como, tiempo y dinero.

Si bien, el ideal es que se analicen todos los activos, también se pueden estudiar solo algunos (opción tomada habitualmente), de modo que se dispongan los recursos para las instalaciones que mayores beneficios puedan ofrecer con su mejora. A su vez, deben ser elegidos con criterios adecuados para la organización y aplicados de manera consciente.

Por otro lado, la norma ISO 14224:2016 “Industria de petróleo, petroquímica y gas natural – recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos” [1] establece límites, taxonomía de los componentes mantenibles de un sistema, sobre los cuales recaerá las estrategias de mantenimiento.

1.1.1.1. Principio de Pareto

El principio de Pareto fue enunciado por primera vez por el economista y sociólogo Vilfredo Pareto (1848-1923), quien concluyo que 80% de la riqueza era ostentada por

20% de la población. Relación que luego fue encontrada en diversos campos sociales, económicos e industriales.

Esta herramienta permite centrarse en los factores que tendrán mayor impacto si son mejorados, logrando así una canalización de esfuerzos. Este establece que, en la mayoría de los casos, los problemas son generados por pequeño grupo de posibles causas.

Según este principio, unos pocos factores son más significativos, los cuales suelen ser 20% del total que, a su vez, causan 80% de los problemas. Se les conoce también como *causas vitales*, dejando del término *causas triviales* para 80% restante.

En la industria podríamos asegurar, por ejemplo, que 80% de las fallas en una instalación son producidas por 20% de los equipos.

En las siguientes figuras se expone un ejemplo del grado de contribución que un grupo de eventos tiene sobre un determinado problema.

Si se opta por confeccionar un diagrama de Pareto por *Cantidad de Fallas*, se deben ordenar de mayor a menor los Equipos según su cantidad de fallas, luego se suma el total de fallas y se calcula la contribución de cada equipo al total, finalmente se agrega una columna con la suma acumulada de los porcentajes.

Tabla 1. Ejemplo de cantidad de fallas por equipos y su frecuencia acumulada.

Equipo	Cantidad de Fallas (Frecuencia Absoluta)	Frecuencia Relativa [%]	Frecuencia Relativa Acumulada [%]
Equipo 1	26	30%	30%
Equipo 2	20	23%	53%
Equipo 3	16	19%	72%
Equipo 4	9	10%	83%
Equipo 5	4	5%	87%
Equipo 6	3	3%	91%
Equipo 7	3	3%	94%
Equipo 8	2	2%	97%
Equipo 9	2	2%	99%
Equipo 10	1	1%	100%
Σ	**86**	**100%**	

El Diagrama de Pareto de Cantidad de Fallas:

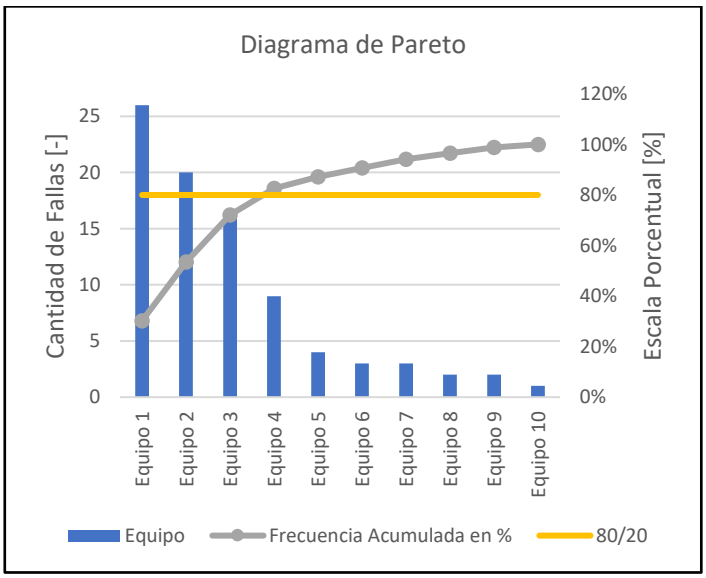


Gráfico 4. Diagrama de Pareto por Cantidad de Fallas.

Al analizar el diagrama podemos ver donde se concentra el 80% de las fallas, que aproximadamente en este ejemplo corresponde a los 4 primeros equipos. Esto quiere decir que se debe enfocar los esfuerzo en solucionar las fallas de esos 4 equipos.

1.1.1.2. Diagrama de Jack-Knife

El método Jack-Knife es una herramienta para priorizar los activos que nos permite clasificar en función del número de veces que ha fallado el equipo en un determinado

periodo y el tiempo medio de reparación de aquellas fallas (MTTR, por sus siglas en inglés, Mean Time To Repair), además se logra inferir de qué manera inciden estos equipos en índices críticos como mantenibilidad y confiabilidad del sistema.

Se pueden estudiar las fallas funcionales, ya sea dependiendo de su procedencia (ítem mantenibles) o del tipo de modo de falla (fuga, desgaste, etc.). Esto dependerá de la plataforma de registros con que se cuenta, es decir, el tipo de reporte que se haya generado al producirse la avería y el objetivo final que se espera al utilizar este diagrama.

Ahora bien, el éxito de este análisis estará en función de la calidad de los registros realizados al momento de producirse la avería al componente mantenible y la cantidad de estos, mientras más registros se posean, mejor será la representatividad de los datos utilizados.

En el método de construcción del diagrama de Jack-Knife; se continua con la representación gráfica de los índices calculados, ahora bien, la tasa de falla va en el eje de las abscisas y el tiempo medio de reparación en el eje de las coordenadas.

Una vez graficados estos datos, se obtiene el promedio de ambas variables representadas, a partir del cual se trazan dos rectas paralelas a los correspondientes ejes. La recta horizontal representa la mantenibilidad del sistema y la vertical, la confiabilidad.

De manera adicional, se pueden trazar curvas de iso-indisponibilidad, estas nos permiten realizar una discriminación de elementos que poseen una menor disponibilidad a la esperada o planteada por la organización. El resultado ser una curva decreciente y convexa, sin embargo, es posible aplicar una escala logarítmica a los datos para linealizar dichas rectas, transformando el grafico a uno de más fácil interpretación.

Las tablas generadas por el proceso descrito, que representan el grafico de dispersión se distribuye de la siguiente manera:

Tabla 2. Tiempo medio de reparación de fallas.

N°	**Equipos**	**N° de Fallas (Cf)**	**Tiempo de detención acumulado (T_d)**	**MTTR $\left(\frac{T_d}{Cf}\right)$**
1	Equipo 1			
2	Equipo 2			
X	Equipo X			
		$Cf_T = \sum_{i=1}^{X} Cf_i$	$T_{d_T} = \sum_{i=1}^{X} T_{d_i}$	

Las rectas límites, que representan confiabilidad y mantenibilidad se obtienen como se expone a continuación:

Tabla 3. Límites del Diagrama de Jack-Knife.

Limite MTTR	T_{d_T}/Cf_T	Mantenibilidad
Limite N° de Fallas	Cf_T/X	Confiabilidad

Para determinar las curvas de iso-indisponibilidad de utiliza la siguiente tabla, donde los valores se obtienen dividendo la más alta no disponibilidad (el número que acompaña a la letra D) por el número de fallas correspondiente. Las rectas de no disponibilidad, como su valor más elevado se determinan según el contexto de la empresa.

Tabla 4. Curvas de iso-indisponibilidad.

N° Fallas	D10	D5	D2	D1
1	10,0	5,0	2,0	1,0
2	5,0	2,5	1,0	0,5
3	3,3	1,7	0,7	0,3
4	2,5	1,3	0,5	0,3
5	2,0	1,0	0,4	0,2
6	1,7	0,8	0,3	0,2
7	1,4	0,7	0,3	0,1
8	1,3	0,6	0,3	0,1
9	1,1	0,6	0,2	0,1
10	1,0	0,5	0,2	0,1
11	0,9	0,5	0,2	0,1
12	0,8	0,4	0,2	0,1

Los datos se comparan y catalogan como indica el siguiente gráfico:

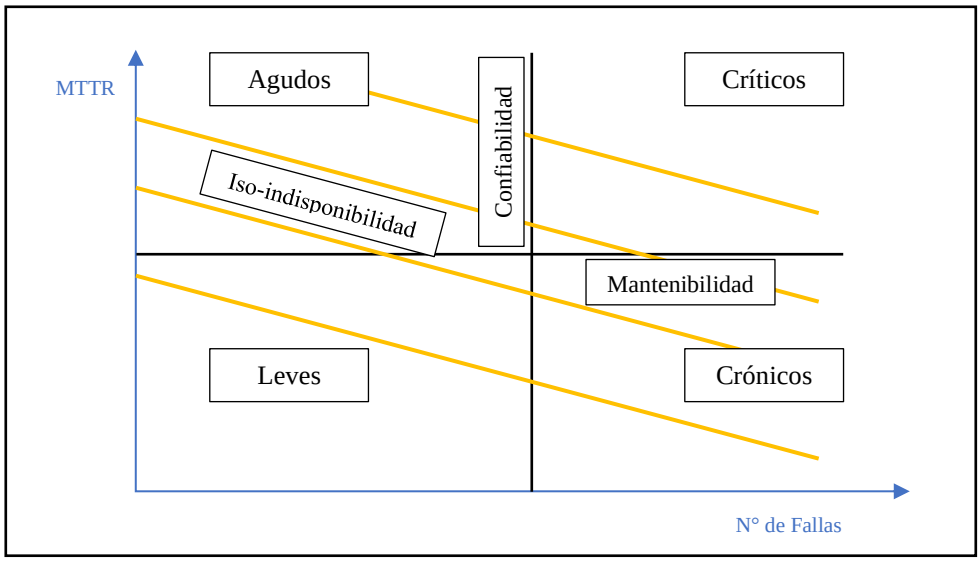


Gráfico 5. Diagrama de Jack-Knife con sus determinas zonas.

Se observa que el grafico se divide en cuatro cuadrantes por las rectas de confiabilidad y mantenibilidad.

- Leve: Zona en donde el número de paradas es menor y las duraciones de estas también se inferior comparadas con los otros ítems mantenibles, por lo que estos componentes son menos relevantes.

- Agudos : En esta zona, si bien el número de detenciones es menor, el tiempo que se tarda en repararlas es elevado, es decir, tiene una mantenibilidad deficiente.
- Crónicos: Aquí se encuentran los equipos que fallan de manera recurrente, por lo cual son poco confiables, sin embargo, su tiempo de reparación es bajo.
- Críticos: Este cuadrante es donde residen las razones de detenciones que involucran un déficit en las estrategias de mantención, ya que presentan ineficiencia en mantenibilidad y reducida confiabilidad. Lo cual se representa como una alta indisponibilidad del activo.

Esta herramienta permite evaluar de manera cuantitativa y cualitativa las variables que gobiernan el mantenimiento, y según esto, en que equipo debo utilizar mis recursos para obtener los mayores beneficios.

1.1.2. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad

Una herramienta esencial para la confiabilidad de activos es la planilla FMECA (por su sigla en inglés, “Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis”). Fue introducida a la industria como un estándar del departamento de defensa de Estados Unidos de América para la gestión de activos en el documento MIL-STD-1629 emitido el 25 de noviembre de 1980 [2].

Esta herramienta se integra al desarrollo de un RCM casi por añadidura, ya que responde las siete preguntas fundamentales dictadas por la norma, mientras que, además, evalúa la criticidad de los efectos de los modos de fallas y como varía según las estrategias de mantenimiento dispuestas. Si bien no está normado este análisis de criticidad, si se indican políticas de manejo de fallas basadas en la probabilidad que ocurran y sus riesgos, más aún, si los modos de fallas afectan al medio ambiente y/o la seguridad la tarea debe reducir la probabilidad de que suceda el modo de falla a un nivel tolerable.

Ahora bien, las siete preguntas que busca responder como regla general, un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad siguiendo los lineamientos de las normas SAE-JA1011 [3] y SAE-JA1012 [4] son las siguientes:

1) ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente?
    - Contexto operacional, funciones y estándares de desempeño.
2) ¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
    - Fallas funcionales.
3) ¿Qué causa cada falla funcional?
    - Modos de falla.
4) ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional?
    - Efectos de falla.
5) ¿Qué puede ocurrir si se presenta cada modo de falla?
    - Consecuencia de los fallos.
6) ¿Qué se puede hacer para evitar, predecir o detectar cada modo de falla?
    - Acciones proactivas.
7) ¿Cómo proceder si no es posible evitar, predecir o detectar el modo de falla?
    - Acciones reactivas.

Estas preguntas están dispuestas de tal modo que constituyen dos etapas definidas claramente. En la primera se determinan *funciones, fallas funcionales, modos de fallas y efectos*, al responder las primeras cuatro preguntas. Esta información genera una planilla nombrada *Hoja de análisis.* La segunda etapa responder las últimas tres preguntas y define las tareas de mantenimiento más efectivas y económicas para evitar que sucedan los modos de fallas, en su defecto establece las acciones reactivas correspondientes. A partir de este análisis, se obtiene la *Hoja de Resultados*, la cual indica la tarea a realizar, su frecuencia y responsable de su desarrollo.

Al complementar estas dos *Hojas* con en análisis de criticidad de los efectos de los modos de falla se genera la planilla FMECA.

1.1.2.1. Hoja de análisis RCM

Determinados los equipos a analizar, se procede a describir sus funciones, limitadas por el contexto operacional y estándar de desempeño. Estas deben ser identificadas en su totalidad, es decir, funciones principales, secundarias y de los dispositivos de protección. Además, sus enunciados deben contener un verbo, un objeto, y un estándar de desempeño, por ejemplo:

"Bombear *(verbo)* agua *(objeto)* del tanque de condensado "X" al tanque flash "Y", a no menos de $75\left[\frac{l}{min}\right]$ *(estándar de desempeño)*"

Estas funciones corresponderán a la **primera columna** de la hoja de análisis.

A continuación, se exponen las fallas funcionales, es decir, estado en el cual el componente deja de realizar su función, de manera total o parcial, por ejemplo:

"Totalmente incapaz de impulsar agua"

"Impulsa agua a menos de $75\left[\frac{l}{min}\right]$*"*

Las fallas funcionales componen la **segunda columna** de la hoja de análisis.

En la **tercera columna** son descritos los modos de falla, que son la parte mas importante del RCM. Un modo de falla es una causa raíz que puede ocurrir en un componente provocando la falla funcional del equipo al que corresponde.

Las fallas funcionales pueden ser ocasionadas por uno o más modos de fallas, como un modo de falla puede provocar una o más fallas funcionales. Ahora bien, los modos de

fallas pueden ser de diversa índole, tales como, física, humana, administrativa o de diseño.

Cuando los elementos mantenibles son complejos y dependen de variables diversas, se recomienda utilizar algunas de las siguientes herramientas enumeradas a continuación:

- Tormenta de Ideas (Brainstorming)

  Proceso participativo y creativo que se nutre del conocimiento de los integrantes del grupo. Herramienta de aproximación inicial e indicadora de dispersión de criterios frente al mismo problema.

- Técnica de los 5 Por qué

  Proceso deductivo y lineal en búsqueda de la causa raíz, consiste en preguntar de manera sucesiva el porqué del problema, validando la respuesta por alguna evidencia.

- Diagrama de Ishikawa (Causa – Efecto)

  Proceso guiado y participativo de análisis de una falla funcional relacionada con varios modos de falla, donde estos se agrupan según características, tales como; métodos, maquina, materiales, mano de Obra y medio Ambiente (las 6M).

- Técnica de las 5W + 1H

  Técnica *pos-morten* que ayuda a minimizar la ocurrencia de la falla. Se responden las preguntas; qué, cuándo, dónde, quién, cuál y cómo, estas permiten describir con mayor exactitud el fenómeno.

- Árbol de Fallas

  Método analítico, deductivo y proactivo que tiene como finalidad simular situaciones causa – efecto que podrían conducir a una falla funcional. La estructura consiste en operadores lógicos donde se asigna una probabilidad de ocurrencia a cada suceso básico para un análisis cuantitativo.

- Análisis Causa – Raíz de falla (Root Cause Analysis “RCA”)

Técnica para resolver problemas complejos de uso *post-morten*. Es un proceso estructurado y deductivo para determinar causa raíces de una falla funcional. En síntesis, define el problema, analiza causas y propone soluciones, puede incluir en su desarrollo cualquiera de las herramientas descritas en los puntos anteriores.

- ISO 14224:2016 [1]

  Estándar Internacional, "Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos en la industria de petróleo, petroquímica y gas natural". Define componentes mantenibles según una pirámide taxonómica y expone un tesauro de sus respectivos modos de falla.

El detalle y profundidad alcanzada al listar los modos de falla depende de la experiencia y conocimiento de los integrantes del grupo y el criterio del facilitador, sin embargo, este debe ser descrito de tal manera que sea posible identificar una política apropiada para el manejo de la falla.

La **cuarta columna** y última de la hoja de análisis responde la pregunta, ¿qué ocurre cuando sucede cada falla funcional? La descripción debe tener la suficiente información para que en el próximo paso se pueda evaluar las consecuencias y ser relatada como si no se estuviese haciendo nada para evitarlo.

1.1.2.2. Análisis de criticidad de los efectos de los modos de falla

El análisis de la criticidad de los efectos provocados por los modos de falla estudiados se puede evaluar de manera cualitativa, cuantitativa o mixtos, según la información histórica disponible en relación con las averías de los componentes mantenibles del sistema estudiado.

La herramienta FMECA utiliza el Numero de Prioridad de Riesgo (o RPN por sus siglas en ingles "Risk Priority Number"), este es un numero adimensional que se obtiene

como el producto de la severidad (S), la probabilidad de ocurrencia (O) y la probabilidad de detección (D).

$$RPN = S \cdot O \cdot D$$

(Fórmula 11)

Se debe calcular para todos los modos de fallas y permite establecer un rango de riesgo tolerable en función del cual, se establece el tipo de manteamiento recomendado por el diagrama de decisión.

La severidad de la falla (S) determina el impacto de la falla cuando ocurre. Se le asigna un valor subjetivo definido por un grupo de expertos, los cuales deben elaborar previamente tablas donde se pondere cada una de las consecuencias dispuestas en una escala del "1" al "10".

Tabla 5. Ponderaciones relativas de severidad de las fallas cuando ocurren según Celulosa Arauco.

Severidad	Descripción	Evaluación
Riesgo de seguridad personal.	Vida y seguridad de la gente está en riesgo: la falla afecta la seguridad del proceso. Eso puede llevar a daños corporativos altos.	10
Violación de la ley.	Violaciones de la ley son posibles: la falla causa una violación de la ley o no cumple con reglas regulatorias (e.g., polución). Personas no están en peligro.	9
Falla total de función primaria, impacto alto en producción.	Función primaria falló totalmente. El equipo no está operacional y genera parada de producción significativa: 100% de pérdida productiva por más de 24 horas.	8
Falla parcial de función primaria, impacto medio en producción.	Función primaria falló parcialmente. El equipo no está totalmente operacional según especificaciones y genera limitación de producción significativa: 100% de pérdida productiva por 12-24 horas o más de 50% de pérdida productiva por más de 24 horas.	7
Falla total de función secundaria, impacto bajo en producción.	Función secundaria falló totalmente: 100% de pérdida productiva por 6-12 horas o más de 50% de pérdida productiva por más de 12 horas.	6
Funciones secundarias limitadas, algún impacto en producción.	Función secundaria falló parcialmente: 100% de pérdida productiva por 2-6 horas o restricciones de capacidad de equipo en standby comprometiendo producción en hasta 50% por hasta 12 horas.	5
Impacto en producción bajo.	100% de pérdida productiva por 0,5-2 horas o restricciones de capacidad de equipo en standby comprometiendo producción en hasta 20% por hasta 12 horas.	4
Impacto en producción muy bajo.	100% de pérdida productiva por hasta 0,5 hora o restricciones de capacidad de equipo en standby comprometiendo producción en hasta 20% por hasta 6 horas.	3

Impacto en producción extremamente bajo.	Baja pérdida productiva. No hay parada completa de producción, pero capacidad de equipos en standby compromete hasta 20% de la producción por menos de 30 minutos.	2
Sin impacto algún	Sin pérdida productiva, equipos en standby totalmente capaces de suplir producción.	1

La probabilidad de ocurrencia (O) se relaciona con la probabilidad de que ocurra el modo de falla en un tiempo determinado, para esto se requiere datos empíricos de manera tal que se pueda aproximar el grado de ocurrencia. De no contar con registros históricos, esta debe ser estimada mediante la opinión de expertos.

Tabla 6. Ponderaciones relativas de probabilidad de ocurrencia de falla según Celulosa Arauco.

Probabilidad	Descripción	Evaluación
Falla ocurre a cada hora	Una falla por hora	10
Falla ocurre a cada turno	Una falla por 8 horas	9
Falla ocurre a cada día	Una falla por día	8
Falla ocurre a cada semana	Una falla por siete días	7
Falla ocurre a cada mes	Una falla por mes	6
Falla ocurre a cada tres meses	Una falla por tres meses	5
Falla ocurre a cada seis meses	Una falla por seis meses	4
Falla ocurre a cada año	Una falla por año	3
Falla ocurre a cada 2 años	Una falla por dos años	2
Falla ocurre a cada 5 años o mas	Una falla por cinco años o mas	1

El grado o probabilidad de detectar la falla (D) indica la posibilidad de detectar la falla antes de que ocurra. Para establecer el ranking de detección es posible realizar una escala en función del intervalo de detección de la técnica a condición utilizada y la efectividad de esta según el intervalo P-F, con recomendación de expertos en el ámbito predictivo.

Tabla 7. Ponderaciones relativas de la probabilidad de detectar la falla antes de que ocurra según Celulosa Arauco.

Probabilidad de detección	Descripción	Evaluación
Virtualmente imposible	Las medidas de prueba y/o monitoreo de máquinas pueden no detectar la posible causa / fallas secuenciales o **no hay** medidas de prueba / **monitoreo** de máquinas instaladas	10
Extremadamente baja	**Extremadamente baja posibilidad** de que medidas de prueba / monitoreo de máquinas van a **reconocer** posible causa / **fallas** secuenciales o **chequeos son aleatorios.**	9
Muy baja	**Muy baja posibilidad** de que medidas de prueba / monitoreo de máquinas van a **reconocer** posible causa / **fallas** secuenciales o **monitoreo no es confiable.**	8
Baja	Las medidas de prueba / monitoreo de máquinas no previenen la ocurrencia del error, **monitoreo va a identificar la causa y habilitar la aislación de la falla** después de su ocurrencia.	7
Media baja	Baja posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo puedan identificar la posible causa / fallas secuenciales. **Monitoreo va a mostrar una falla.**	6
Media	Posibilidad media de que medidas de prueba / monitoreo pueden reconocer la causa o fallas secuenciales. **Monitoreo va a mostrar una falla anticipadamente.**	5
Media alta	Posibilidad ligeramente alta de que medidas de prueba / monitoreo pueden reconocer la causa o fallas secuenciales. **Monitoreo puede prevenir una falla anticipadamente.**	4
Alta	Alta posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo puedan reconocer causa o fallas secuenciales. **Monitoreo muestra dato en tiempo real** para identificar fallas y causas anticipadamente. **Fallas pueden ser prevenidas con éxito.**	3
Muy alta	Muy alta posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo puedes reconocer la causa o fallas secuenciales. **Monitoreo muestra dato en tiempo real** para identificar fallas y causas anticipadamente. F**allas pueden ser prevenidas con éxito.**	2
Casi cierta	La medida de prueba / monitoreo ciertamente reconoce la causa o fallas secuenciales. **Monitoreo muestra dato en tiempo real** para identificar fallas y causas anticipadamente. F**allas pueden ser prevenidas con éxito.**	1

Una vez calculado el RPN se puede realizar una iteración de los componentes mantenibles determinados al comienzo del proceso, ya sea desestimando un análisis más profundo de modos de falla con bajo índice, o agudizando el estudio de averías con consecuencias más riesgosas. De manera que se pueda optimizar el uso de los recursos empleados en el proceso.

1.1.2.2.1. Curva e intervalo P-F

La mayoría de los modos de falla no suceden de manera instantánea, por lo que es posible detectarlos en su etapa final de deterioro antes de alcanzar el estado de falla.

Se define como *falla potencial*, a la condición identificable que indica que una falla está a punto de ocurrir o en proceso de ocurrencia [4]. Si esta condición es detectada, podría ser posible prevenir que elemento falle completamente y/o evitar sus consecuencias.

En la curva P – F, el punto “P” es donde el deterioro se hace detectable por el método de inspección correspondiente y si esta no es corregida terminara convergiendo en el punto de falla funcional “F”

El tiempo que tiene el equipo de inspección para detectar la falla funcional es el intervalo P-F, por lo que la frecuencia de inspección debe ser menor a este. Ahora bien, se debe considerar que si la frecuencia supera este intervalo es probable que falle el equipo, en cambio, si esta es muy inferior, se estarán utilizando recursos innecesarios en el proceso de revisión. Se suele utilizar una frecuencia de inspección de un tercio de este intervalo.

En la siguiente figura se expone la curva descrita y una relación comparativa de como varia el intervalo P – F en función del método de inspección.

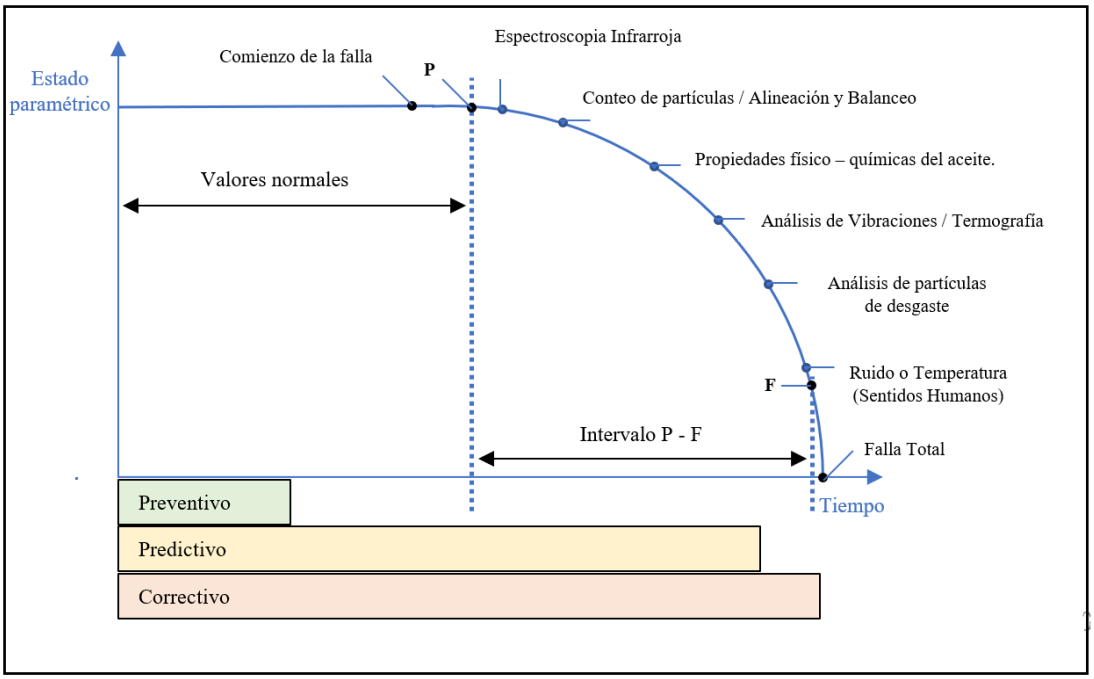


Gráfico 6. Curva P-F. Relación cualitativa entre métodos de inspección e intervalo P-F.

Se suele dividir la curva P-F, para fines referenciales, en acciones de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, se observa que estas dos últimas permiten obtener el mayor rendimiento del activo, más aun, el paso de una estrategia preventiva a predictiva puede llegar a aumentar significativamente su duración [22].

1.1.2.3. Hoja de Resultados RCM

Las últimas tres preguntas en el proceso RCM, determinan las políticas a utilizar para el manejo adecuado de cada modo de falla identificado en la *Hoja de Análisis*. Debido a la variedad de posibles soluciones, la norma SAE JA-1012 recomienda utilizar dos aproximaciones distintas para seleccionarlas [4].

Una aproximación es rigurosa, la cual indica evaluar las consecuencias económicas y en la seguridad/medio ambiente de cada modo de falla, considerar todas las políticas de manejo factibles y seleccionar la que mejor se ajuste considerando costo y efectividad. Si bien segrega esta aproximación en modos de falla ocultos y evidentes,

impulsa un proceso lento y detallado de cada estrategia de mantenimiento, si bien, el resultado será el más optimo, el proceso en si carece de esta cualidad.

Por otro lado, se propone el uso de un diagrama de decisión el cual se basa en ciertas suposiciones que consideran algunas políticas inherentemente más costo-efectivas que otras.

1.1.2.3.1. Diagrama de decisión de estrategias de mantenimiento

El diagrama de decisión establece una aproximación jerárquica a las políticas de mantenimiento recomendadas por el proceso RCM, evalúa cuando impacta el modo de falla y define la estrategia más adecuada para cada caso.

La manera en que esta herramienta optimiza el método es realizando las siguientes suposiciones:

a) Las tareas basadas en condición son las más efectivas, en términos de costos, que las otras, ya que se realizan en terreno, son fáciles de organizar, tienen generalmente una relación intrínseca con la tarea correctiva y permiten comprender casi toda la vida útil del activo.
b) Si no es viable una tarea por condición se recomienda un reacondicionamiento programado, estas acciones usualmente se realizan cuando el equipo está detenido y es enviado a talleres de reparación, generando trabajos de mayor envergadura. Además, las actividades de recuperación se realizan sin importan la condición, por lo que serán retirados componentes que aún tienen tiempo de uso a condiciones normales de operación.
c) El mantenimiento correctivo solo es admisible cuando el costo de las consecuencias de una falla no prevenida es menor que el costo de alguna política de manejo de dicho modo de falla, sin embargo, no es admisible operar hasta la falla cuando estas consecuencias atentan contra la seguridad o el medio ambiente.

d) La última opción siempre será el rediseño o cambio de especificaciones, ya que esta acción tarda habitualmente más de seis meses en llevarse a cabo, además, los cambios son costos y pueden generar más problemas que soluciones. Por lo que se recomienda agotar las otras instancias antes de optar por esta alternativa.

En síntesis, el diagrama de decisión responde las últimas tres preguntas de la metodología RCM indicadas por la norma [4]

La quinta pregunta, que determina las consecuencias de los fallos, le da respuesta dividiéndolas en 6 categorías:

Tabla 8. Categorías de las consecuencias de los modos de falla.

	Fallas con consecuencias:		
El modo de falla es:	**Seguridad o Medio Ambiente** (Nivel Intolerable)	**Operacionales** (Producción)	**No operacionales** (Gastos en Reparación)
Evidente	I	III	V
Oculta	II	IV	VI

Las siguientes preguntas son respondidas de manera intrínseca en el diagrama de decisión, en donde primero se determina si son viables actividades proactivas, o en su defecto, se opta por acciones correctivas.

Se expone el diagrama de decisión dividido en dos partes, la primera corresponde a las fallas evidentes y la siguientes a falas oculta.

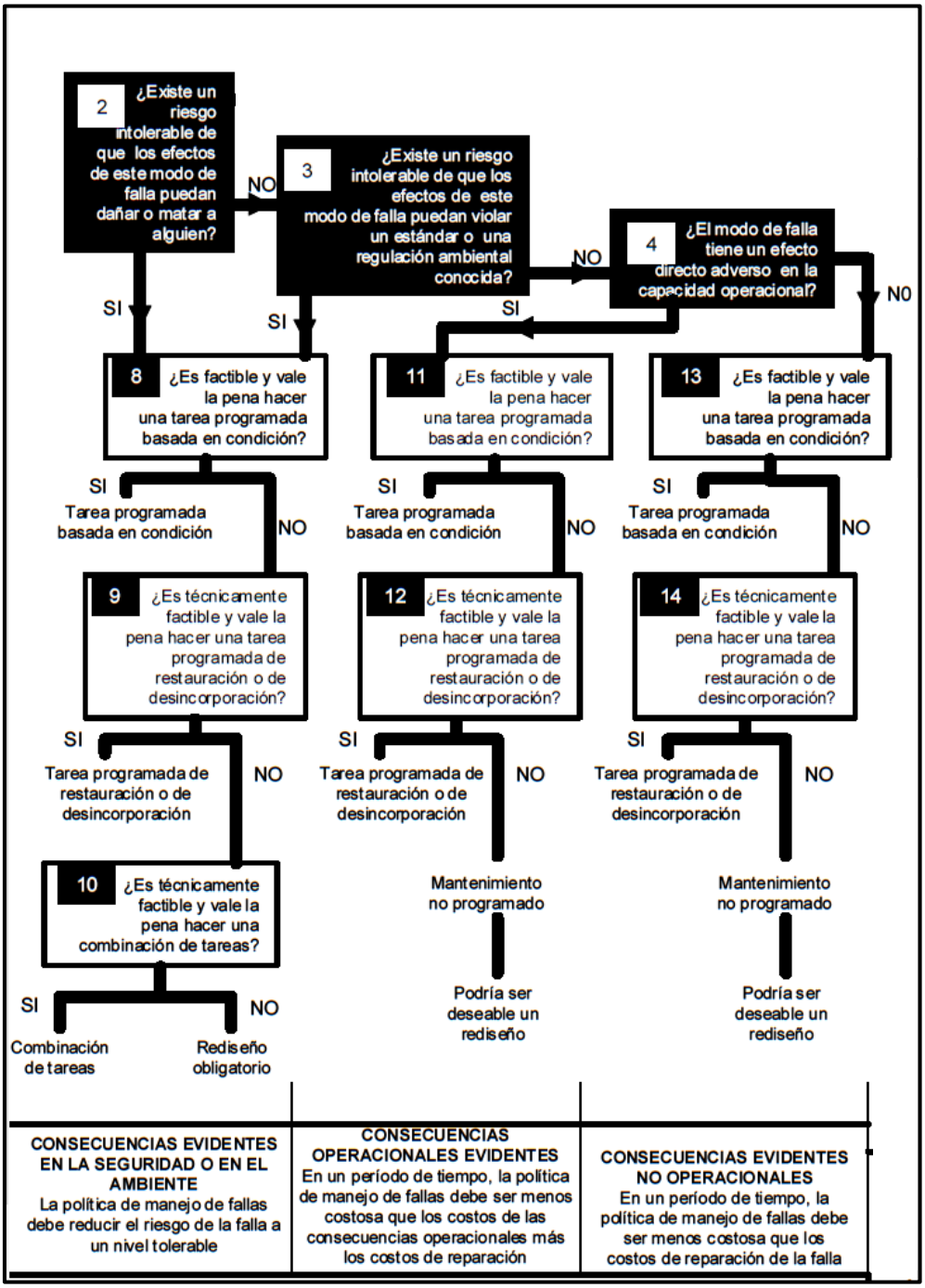


Figura 3. Diagrama de decisión de políticas de mantenimiento para fallas funcionales evidentes (Fuente: SAE JA1012:2002 [4]).

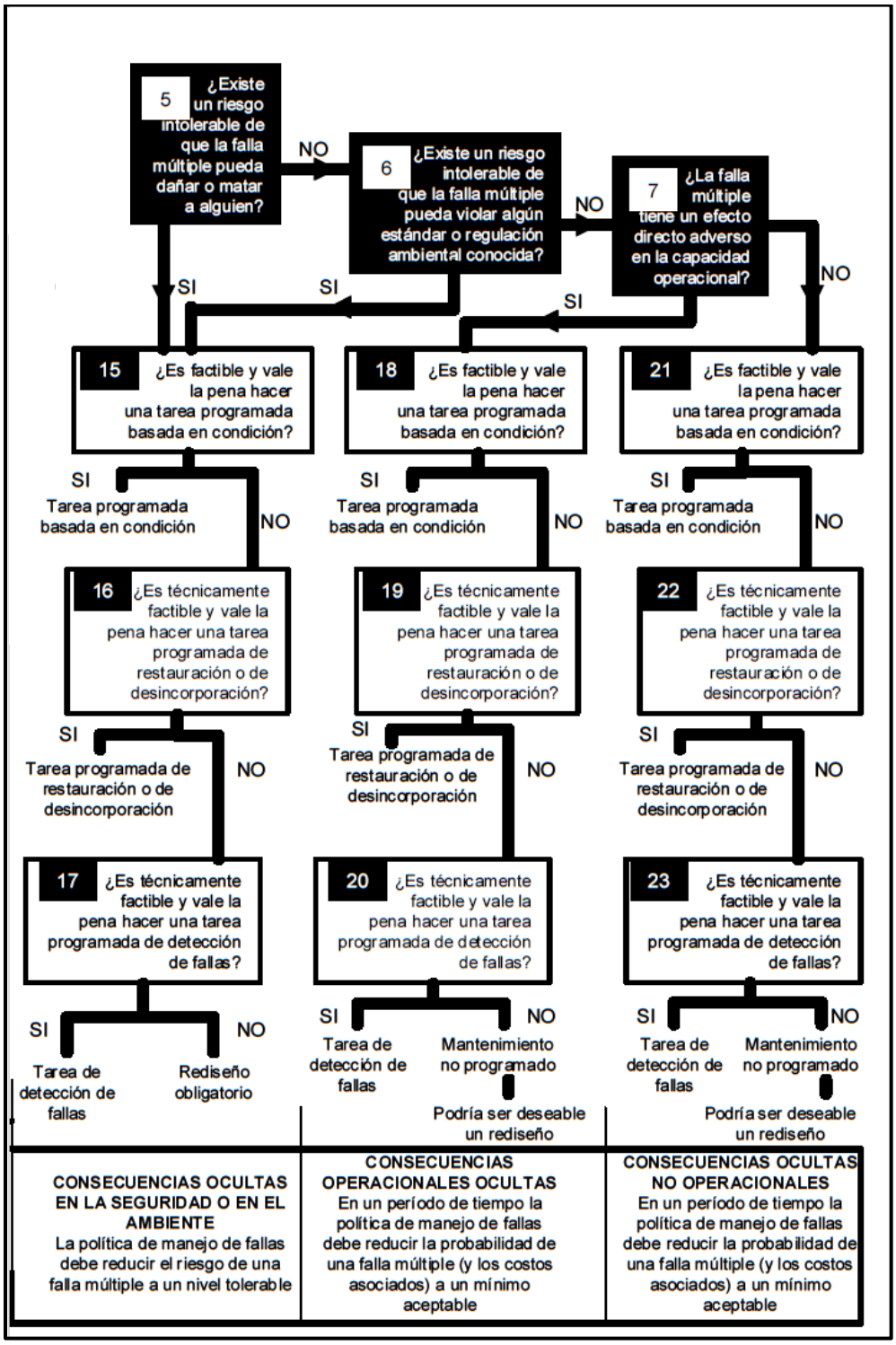


Figura 4. Diagrama de decisión de políticas de mantenimiento para fallas funcionales ocultas (Fuente: SAE JA1012:2002 [4]).

Si bien los diagramas son aparentemente fáciles de utilizar y cumplen con los principios dictados por la norma [4], cada decisión se debe realizar con fundamentos reales. Las políticas deben ser evaluadas respecto a su factibilidad técnica y corroborar tratará efectivamente las consecuencias del modo de falla estudiado.

1.2. Software de planificación de recursos empresariales

La empresa cuenta con un sistema de planificación de recursos empresariales (ERP, por sus siglas en inglés, Enterprise Resource Planning) llamado SAP, nombre de la empresa responsable de su desarrollo (Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung, o "Sistemas, Aplicaciones y Productos en Procesamiento de Datos [21]). Este recurso cuenta con variables módulos de servicio, tales como, financiero, contable, recursos humanos, entre otros, como el módulo de mantenimiento de planta (PM, por sus siglas en inglés, Plant Maintenance [21]).

Conceptos claves utilizados por un ERP de Gestión del Mantenimiento, en este caso SAP PM:

- Ubicación técnica: Es la estructura jerárquica con la cual se pueden representar estructuras complejas, inamovibles y multiniveles, se utilizan para establecer una estructura vertical de sistemas técnicos. Se pueden organizar de acuerdo con criterios: espaciales, procesos y funciones.
- Equipo:
  Son objetos individuales, físicos y movibles que requieren un histórico de mantenimiento independiente. Uno o más equipos pueden ser instalados en una misma ubicación técnica, e incluso pueden cambiar de ubicación a lo largo del tiempo en caso necesario. Los equipos son el nivel jerárquico inferior al que se pueden desglosar los costes de mantenimiento.
- TAG:
  Código que identifica la posición de montaje de un equipo, instrumentos, etc.

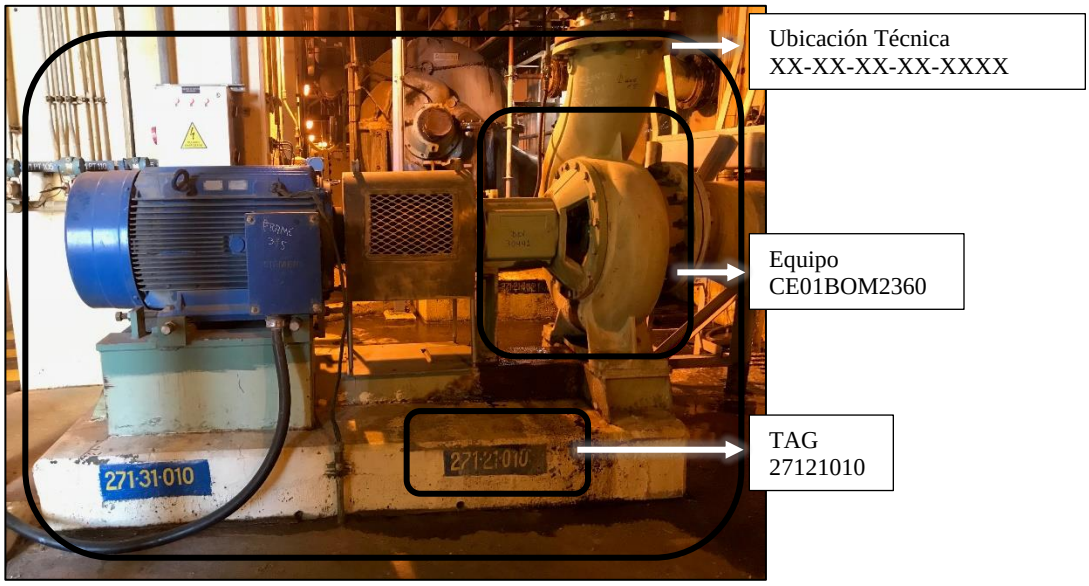


Figura 5. Representación de Ubicación Técnica, Equipos y TAG.

La ubicación técnica en este ejemplo se subdivide en:

Planta – Macroproceso – Proceso – Sistema – Subsistema (TAG)

El proceso de mantenimiento de Celulosa Arauco tiene como uno de sus pilares fundamentales la mejora continua, este se esquematiza en la siguiente figura, en donde cada etapa se respalda de una u otra manera en el recurso SAP PM.

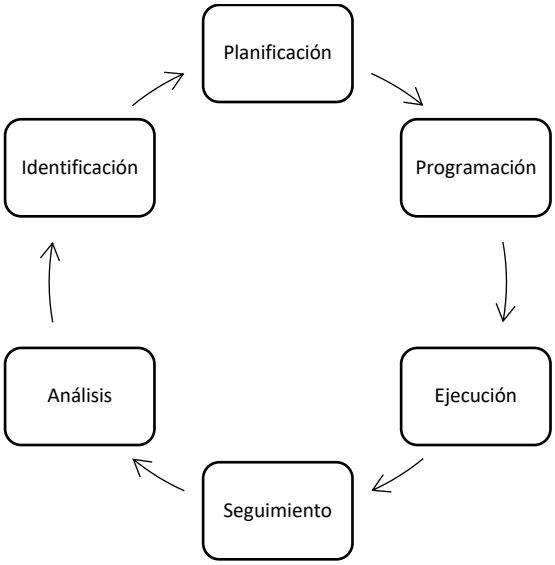


Figura 6. Modelo de gestión de mantención Celulosa Arauco.

Identificación se sustenta en los *avisos de mantenimiento*, mediante los cuales se notifican las averías que ha sufrido un equipo, y las acciones que se desarrollan a fin de repararlas. Este documento maneja información estadística y contiene todos los datos que se usarán en la Planificación y Análisis. El aviso no reúne información de costos, materiales y servicios, los cuales son datos propios de la orden de mantenimiento.

En la Planificación subyacen las *ordenes de mantenimiento*, es el documento de mayor importancia en la gestión del mantenimiento. En la misma se establecen las tareas que deben ser realizadas por el personal de mantenimiento y los recursos que serán necesarios. Estos recursos se encuentran agrupados en tres grandes grupos: mano de obra interna, materiales, servicios externos.

La orden de mantenimiento es un objeto de costo. En una primera etapa se planifican los costos de ejecución de las tareas de mantenimiento. Luego la orden colecta los costos reales mediante notificaciones de horas, movimientos de almacén, compras particulares y confirmación de servicios. Finalmente, todos los costos colectados se liquidan al centro de costo receptor (dueño del equipo reparado).

También en la Planificación se encuentran los *planes de mantenimiento preventivo*, estos son datos maestros de mantenimiento que se utilizan para programar órdenes automáticas preventivas con frecuencias establecidas.

La creación de un plan de mantenimiento es una tarea principalmente realizada cuando se compra un nuevo equipo, cuando se cambia una estrategia o cuando se decide realizar un nuevo mantenimiento preventivo.

A su vez en la etapa de Programación, estos deben ser programados para que comiencen a generar ordenes automáticamente o en forma manual, dependiendo de la estrategia de mantenimiento (basada en tiempo o contador), los parámetros de programación del plan y el offset de inicio de plan.

En la gestión de datos maestros también se considera apropiado definir los siguientes conceptos:

- Puesto de trabajo (PTR): Representa un grupo de personas o máquinas responsables de la ejecución de los trabajos de mantenimiento, estos se utilizan para medir las horas trabajadas por cada orden y el costo de mano de obra asociado.
- Hojas de Ruta: Es un dato maestro utilizado para planificar tareas a ejecutar en un equipo o ubicación técnica. En la misma se establecen también los recursos que serán necesarios para la ejecución de las tareas. Estos recursos se encuentran agrupados en tres grandes grupos: mano de obra interna, materiales, servicios externos.
- Conjuntos y Listas de Materiales: Se utilizan para estructurar las diferentes partes de los equipos y los repuestos asociados a los mismos. Los conjuntos de mantenimiento representan las partes funcionales de un equipo. Las listas de materiales para equipos representan el listado de los conjuntos pertenecientes a un equipo (o repuestos) y las listas de materiales para materiales representan los repuestos pertenecientes a esos conjuntos. Las listas de materiales y los conjuntos

son datos maestros exclusivos de mantenimiento y deben ser actualizados con suma atención, ya que forman parte de la estructura técnica de la planta.

2. Descripción de empresa y su contexto

Celulosa Arauco y Constitución S.A. (en adelante, la "empresa", la "compañía" o ARAUCO) es una empresa de carácter global en la industria forestal, ofrece productos sustentables y de calidad para las industrias del papel, construcción, embalaje, mueblería y energía [6].

Figura 7. Logo de Celulosa Arauco y Constitución S.A (Fuente: Memoria anual ARAUCO [6]).

Sus productos los desarrolla en base a recursos forestales renovables, donde su patrimonio forestal en Sudamérica es de $1{,}8[MMha]$, además estos productos son comercializados con más de 4.400 clientes en todo el mundo.

Sus oficinas comerciales y complejos productivos se distribuyen en 11 países, con presencia en los 5 continentes, certificadas bajo estándares internacionales de gestión, calidad, medio ambiente y seguridad, labores las cuales con realizadas por cerca de 17.000 trabajadores guiados por una misma estrategia corporativa.

2.1. Plan estratégico de ARAUCO

"Basamos parte de nuestro crecimiento en la generación de economías de escala y ventajas competitivas sostenibles en el tiempo para desarrollar productos con vocación de innovar, con nuevas soluciones que entreguen valor agregado, con estándares máximos en sostenibilidad y con foco en la calidad, para que sean siempre una alternativa superior" [6].

2.1.1. Visión

La visión de ARAUCO es contribuir a mejorar la vida de las personas, desarrollando productos forestales para los desafíos de un mundo sostenible.

- Producir y gestionar recursos forestales renovables
- Ser una empresa global que hace suyos los desafíos de estar presente en el mundo.
- Crear productos que mejoren vida de las personas.

2.1.2. Valores

- Seguridad : Siempre lo primero.
- Compromiso : Trabajar con pasión.
- Excelencia e innovación : Querer ser los mejores.
- Trabajo en equipo : Juntos somos más.
- Buen Ciudadano : Respetar el entorno y crear valor.

2.2. Política de Medio Ambiente, Calidad, Seguridad y Salud Ocupacional.

Considerando que la protección del medioambiente, la calidad de sus productos, así como la seguridad y salud ocupacional de sus trabajadores y colaboradores son condiciones necesarias para el desarrollo sustentables de sus actividades, productos y servicios, Celulosa Arauco y Constitución S.A. se compromete a [6]:

- **Cumplir** con la legislación y otros compromisos suscritos en materia de medioambiente, calidad, seguridad y salud ocupacional en sus actividades, productos y servicios, incluidos los principios y criterio de los estándares FSC® y CERTFOR.
- **Cumplir** los requisitos de sus clientes orientados a desarrollar relaciones de largo plazo.

- **Mejorar** continuamente el desempeño de sus procesos con un enfoque integrado de riesgos, gestionando adecuadamente los aspectos ambientales significativos, la seguridad y salud ocupaciones y la calidad de nuestras actividades, productos y/o servicios.
- **Prevenir** los accidentes, enfermedades profesionales y la contaminación ambiental en sus actividades, productos y servicios.
- **Asegurar** que todos los trabajadores, propios y de empresas de servicios, reciban la capacitación adecuada para cumplir con sus obligaciones, y proporcionarles los medios para que realicen un trabajo bien hecho y responsable, respetando los estándares de calidad, medioambiente, seguridad y salud operacional.
- **Difundir** estos conceptos y compromisos entre sus trabajadores, empresas de servicios, proveedores relevantes y otras partes interesadas.

Todo el personal que trabaja en ARAUCO es responsable de cumplir y hacer cumplir esta política de medioambiente, calidad, seguridad y salud ocupacional, teniéndola presente en su comportamiento y decisiones diarias.

2.3. Identificación de la Entidad

ARAUCO es constituido como una Sociedad Anónima, con razón social; Celulosa Arauco y Constitución S.A., la cual se inscribió en el registro de valores según el N°42 del 14 de junio de 1982.

El mayor accionista en la sociedad es Empresas Copec S.A., esta a su vez, tiene como principal accionista a Antarchile S.A., de quien son accionistas mayoritarios el grupo Inversiones Angelini y Compañía Limitada, los porcentajes de esta distribución se exponen en la siguiente figura.

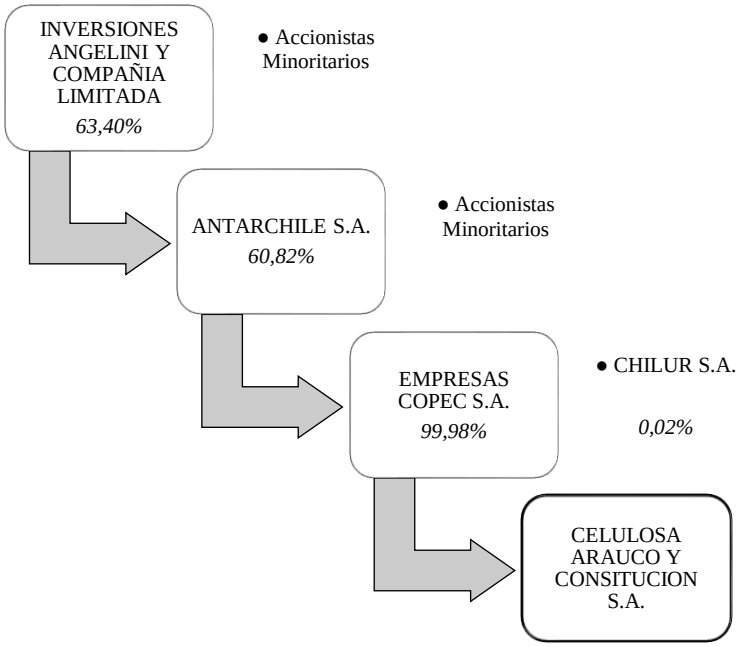


Figura 8. Accionistas mayoritarios de Celulosa Arauco y Constitución S.A.

2.4. Reseña histórica

La empresa nace en 1979 a partir de la fusión de las compañías Celulosa Arauco S.A. y Celulosa Constitución S.A., ambas creadas por la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo) con el fin de desarrollar los recursos forestales del país, hacer uso de suelos degradados por la producción agrícola o no apto para este propósito y fomentar el empleo en zonas aisladas.

Estas empresas, Celulosa Arauco y Celulosa Constitución, fueron creadas en los años 1967 y 1969 respectivamente, para luego ser privatizadas por el mismo Corfo en 1977 y 1979, y ser adquiridas por la Compañía de Petróleos de Chile S.A. (Empresas Copec S.A), las cuales hoy en día son propietarios de un 99,98[%] de ARAUCO.

Fue en 1986 cuando el grupo de inversiones de la familia Angelini, liderado en esos años por Anacleto Angelini, compro el 41[%] de Empresas Copec S.A. Su política corporativa de fuerte inversión, integración vertical y horizontal promovió un

crecimiento exponencial, ubicando a ARAUCO como la empresa líder del negocio forestal en la región y un competidor relevante a escala global.

La primera inversión importante, fue la expansión del complejo Arauco, duplicando su capacidad en 1991 por $US\$\,600\,[MM]$. A continuación, realizó una serie de inversiones enfocadas en la industria forestal, integrando toda su cadena de recursos y suministros, tanto en el país, como en Latinoamérica y el mundo.

Durante los años 2018 y 2019 ha aumentado fuertemente su participación en la industria Estadounidense y Brasilera, sin embargo, esto no ha mermado su expansión en Chile, dicho esto, actualmente se encuentra en su etapa de construcción una nueva expansión en el Complejo Arauco, bajo el nombre de proyecto MAPA (Modernización de la Planta Arauco), el cual duplicara nuevamente su capacidad de producción de celulosa [6].

2.5. Sector Industrial

Arauco es una de las mayores compañías forestales del mundo, con activos forestales y operaciones industriales en Chile, Argentina, Brasil, Uruguay, Estados Unidos y Canadá, además, posee el $50[\%]$ de la empresa SONAE, con presencia en España, Portugal, Alemania y Sudáfrica.

Estas plantaciones se gestionan según prácticas de Manejo Forestal Responsable y son destinadas, en su gran mayoría, para satisfacer los requerimientos internos de la empresa. Estos bosques son manejados de manera integral, lo cual constituye el modelo de negocio de economía de escala de ARAUCO, donde distingue un desarrollo industrial en el área Forestal, Celulosa, Madera, Paneles y Bio-Energía, a modo de maximizar el valor de cada árbol.

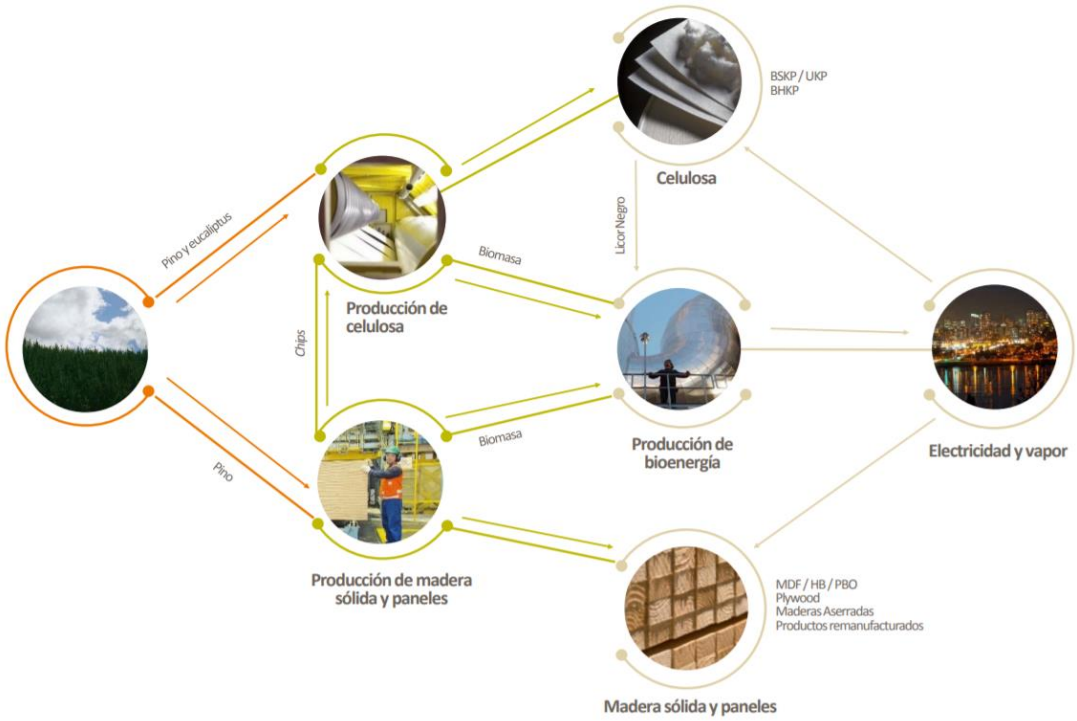


Figura 9. Áreas de Negocio en las cuales se desarrolla ARAUCO (Fuente: Presentación Roadshow ARAUCO, Octubre 2018 [29]).

2.5.1. Industria y negocio forestal.

En el mundo existen 3.995,79 $[MMha]$ de tierras destinadas para bosque, de las cuales el 7,34[%] corresponden a bosques plantados y manejados por el hombre, mientras que el resto son bosques nativos. A su vez en Chile hay 18,04$[MMha]$, donde 16,88[%] son destinadas a plantaciones forestales [26].

El sector forestal representa un 1,83[%] del PIB nacional en 2017, en donde se comercializa principalmente pino radiata y eucaliptos.

Ahora bien, la procedencia del pino radiata es el sur de California y fue introducido a Chile a finales del siglo XIX, en donde se adaptó de buen modo superando incluso el ritmo de crecimiento con que se caracterizaba en Norte América. Por otro lado, los

eucaliptos son oriundos de Australia y fueron traídos a Chile en la época de apogeo de la minería de carbón en la VIII Región para hacer de soportes en los túneles.

Las exportaciones forestarles en el País, se suelen dividir en:

a) Productor de extracción como rollizos aserrables y pulpables.
b) Productos primarios como madera aserrada, tableros, celulosa, papel periódico y astillas.
c) Productos secundarios como madera elaborada, molduras, marcos, muebles, partes y piezas de madera.
d) Manufacturas de papel y cartón.

Durante el 2018 las exportaciones del negocio forestal en el país alcanzaron los $US\$\ 6.667\ [MM]$, las cuales, respecto al año anterior vieron un aumento del 24 [%].

Ahora bien, Celulosa Arauco y constitución S.A. cosecho durante el año 2018, $22{,}3[MMm^3]$ de rollizos.

2.5.2. Industria y negocio de celulosa.

La celulosa es uno de los commodities de mayor presencia en los productos de uso cotidiano en la vida de las personas. Es obtenida de la fibra de madera, utilizada para la manufactura de papel de impresión y escritura, papel higiénico y sanitario, cartulinas y material de empaque.

2.5.2.1. La Celulosa

La celulosa es una biomolécula que se encuentra en la pared celular de los vegetales, si los árboles estuvieran hechos exclusivamente de celulosa, sus troncos no tendrían la consistencia suficiente como para mantenerse erguidos. Lo que proporciona a un tronco su rigidez es lignina, un pegamento natural que une las fibras de celulosa.

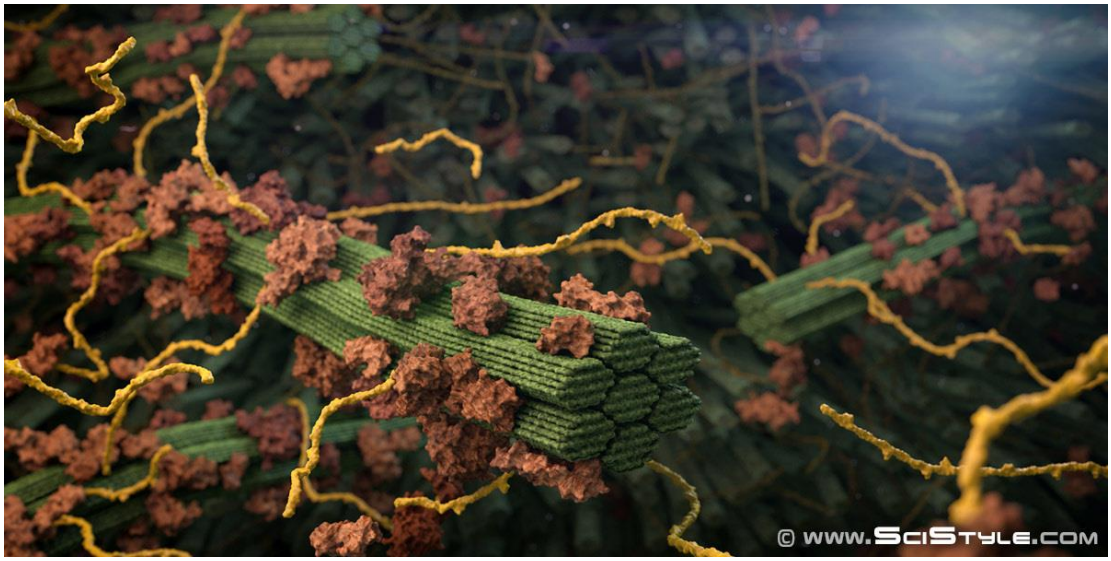


Figura 10. Reproducción ilustrada de los componentes de la pared celular. Fibras de celulosa (prisma curvo hexagonal), lignina (incrustaciones esféricas irregulares) y hemicelulosa (hebras heterogéneas). (Fuente: Thomas Splettstoesser [27].)

Para obtener la pulpa de celulosa se pueden utilizar distintos métodos, tales como; la trituración mecánica de la madera, donde mediante esfuerzos mecánicos y adición de agua se obtiene la pulpa de celulosa, sin embargo, tiene elevada presencia de lignina lo que la vuelve amarilla con el tiempo. También puede ser triturada utilizando vapor, método denominado termomecánico.

Ahora bien, ARAUCO utiliza en sus plantas industriales el método químico, donde la madera una vez triturada se mezcla con productos químicos que disuelven la lignina y dispersa las fibras de celulosa sin dañarlas.

Figura 11. Reproducción ilustrativa de pared celular atacada químicamente. Fibras de celulosa dispersas y menor presencia de lignina (Fuente: Thomas Splettstoesser [27]).

2.5.2.2. Mercado de la Celulosa

Si bien la hoja de celulosa es transada en el mercado internacional (Market Pulp) como un commodity por su homogeneidad, el producto final puede diferenciarse según su grado de elaboración y especie de procedencia, características que se exponen a continuación:

Tabla 9. Características diferenciadoras de la celulosa.

		Especie de procedencia	
		Fibra larga (Pino)	Fibra corta (Eucalipto)
Grado de elaboración	Cruda	UKP Unbleached Softwood Kraft Pulp	– o –
	Blanquead	BKP Bleached Softwood Kraft Pulp	EKP Bleached Eucalyptus Kraft Pulp

La demanda de celulosa suele ser muy estable (no así su precio), sin embargo depende en gran medida por la situación económica de sus principales importadores, Europa y

Asia, la recuperación de los países europeos a impulsado el aumento de la demanda de Celulosa, por otro lado, debido a motivos medioambientales y para cumplir estándares internacionales, China ordenó el cierre de una considerable cantidad de molinos ineficientes y prohibió parte de las importaciones de fibras recicladas, presionando la disponibilidad. Mientras, la demanda de papel en el país sigue aumentando.

Durante el año 2018 hubo una demanda mundial de $75[MMt]$ de celulosa y se estima un incremento del $6{,}25[\%]$ para el 2022, no obstante, solo cerca de $59{,}3[MMt]$ son transadas en el Market Pulp, y el resto es utilizado por productores integrados para la fabricación de papel.

Respecto de la capacidad de producción de celulosa del mercado, en 2018 ésta alcanzó $73{,}05[MMt]$, cubriendo solo un $97{,}4[\%]$ de la demanda mundial. El precio de la celulosa se caracteriza por ser volátil y se determina por los inventarios existentes y estimaciones de la demanda, por este motivo durante el 2018 su precio aumento de $800[US\$/t]$ a $1050[US\$/t]$, el cual se tendió a estabilizar el 2019, pero de igual manera continua elevado en comparación a años anteriores.

ARAUCO posee 5 plantas de celulosa en Chile, 1 en Argentina y 1 en Uruguay a través de un *joint ventur* con Store Enso (empresa sueco-finlandesa), plantas en las cuales fueron producidas $3{,}8[MMt]$ de celulosa durante el 2018 con ventas por $3.045[MMUS\$]$, destinadas principalmente a Asia y Europa.

2.5.3. Otras industrias y/o negocios de la empresa.

La empresa también presenta otras áreas de negocios complementarios entre ellos, una estrategia clave para optimizar los beneficios obtenidos al aplicar la economía de escala en sus inversiones.

Una de esta es la **industria de paneles**, se denomina paneles a los tableros compuestos por elementos de madera de varios tamaños, desde chapas hasta fibras, las cuales se

mezclan con químicos y resinas con los que se forma una pasta que, al ser trabajada con calor, adquiere una forma sólida, similar en características a la madera, pero con significativas ventajas en precios, durante 2018 las ventas alcanzaron los US$2.762 millones, concentradas principalmente en Estados Unidos, Brasil, Asia y Chile.

Otra área en la que desarrolla la empresa es en **la industria de la energía**, la compañía se autoabastece de energía eléctrica y participa aportando los excedentes de sus plantas industriales a la matriz energética de los países en que opera. Hoy ARAUCO es uno de los principales generadores de energía renovable no convencional (ERNC) en Chile con capacidad instalada de 606 MW y una capacidad de 219 MW para ser aportados al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Adicionalmente, posee una capacidad instalada de 82 MW en Argentina y una capacidad instalada de 91 MW en Uruguay.

2.6. Planta Horcones

La empresa en Chile cuenta 4 tipos de Plantas Industriales que se correlacionan con el Negocio Forestal, las cuales son; Plantas de Celulosa (5), Aserraderos (8), Plantas de Paneles (3) y Plantas de Remanufactura (5), distribuidas en el sur de chile, donde las más australes se encuentran en el Complejo Industrial Valdivia.

Ahora bien, en el Complejo Industrial Horcones conviven estos 4 tipos de estas Plantas, administrando sus recursos y productos de manera integrada.

2.6.1. Ubicación y accesos

Se encuentra ubicada en Ruta 160, Los Horcones s/n, Arauco, Región del Biobío, cuenta con un acceso principal al edificio administrativo y al sector norte del complejo, y, además, otro a la planta de paneles, preparación madera y dependencias del sector sur. Este complejo se encuentra ubicado a $60[km]$ al sur de Concepción.

En la siguiente ilustración se exponen las distintas áreas productivas de la planta:

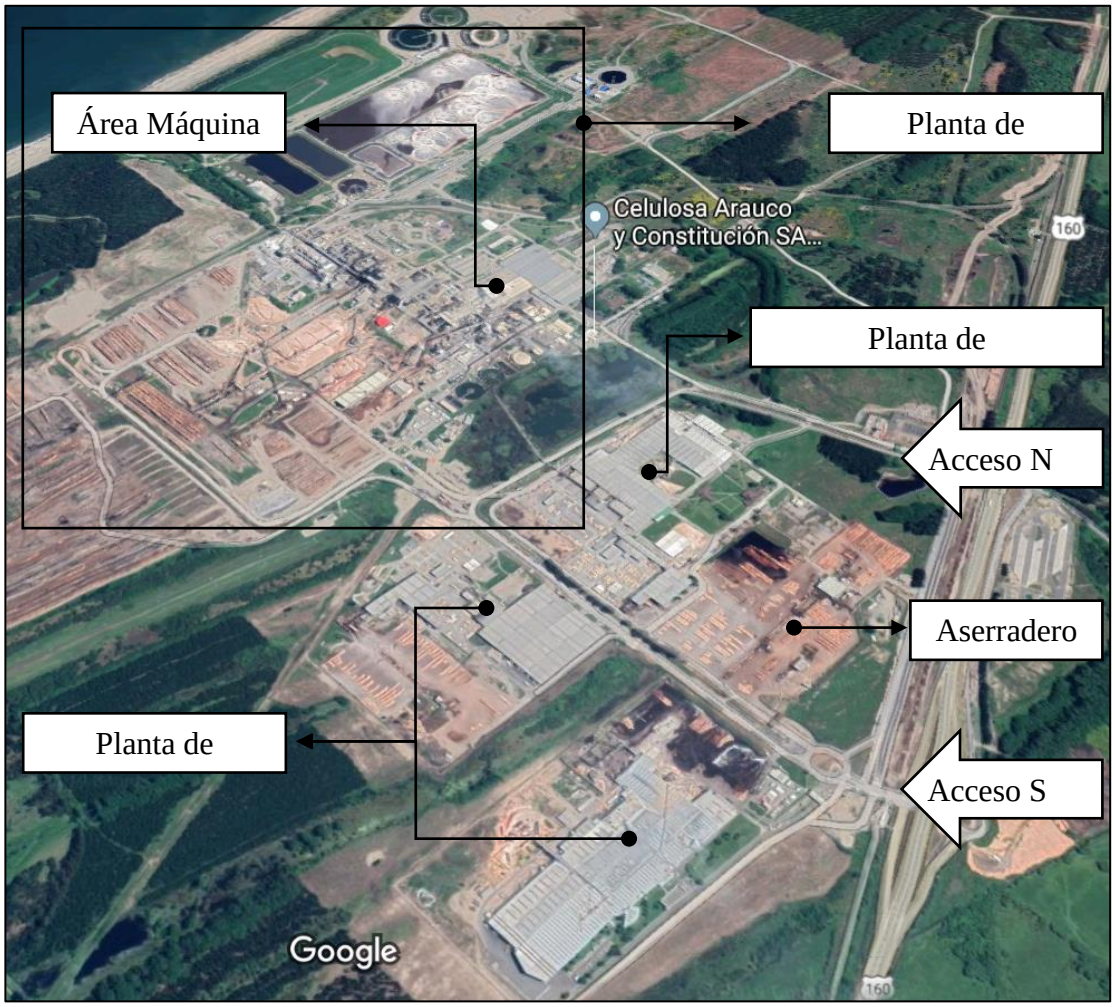


Figura 12. Distribución de Áreas Productivas y Accesos del Complejo Horcones. (Fuente: Google Maps, 2019)

2.6.1.1. Organigrama Administrativo

La administración se compone por el Directorio, cuya misión principal es maximizar el valor de la empresa y designar a los miembros de la Administración Superior, quienes son los encargados de implementar las acciones asociadas a este desarrollo.

El Directorio lo componen 9 miembros titulares, sin existir suplentes y reelegidos cada 3 años de manera indefinida.

La alta administración la componen el Vicepresidente Ejecutivo, el Gerente General y 5 vicepresidentes, responsables de los distintos negocios. El Vicepresidente del Negocio de Celulosa y Energía es a quien debe responder el Gerente Complejo-Celulosa Arauco, en donde se limita el presente trabajo.

2.6.1.2. Organigrama de Complejo Horcones

La estructura organizacional del Complejo Horcones se compone principalmente de manera vertical en orden descendente de Gerente, Subgerentes, Superintendentes, Jefes de Área y Lideres; con responsabilidades independientes para las labores de Producción, Procesos, Mantención e Ingeniería. El organigrama de dicha estructura se expone a continuación.

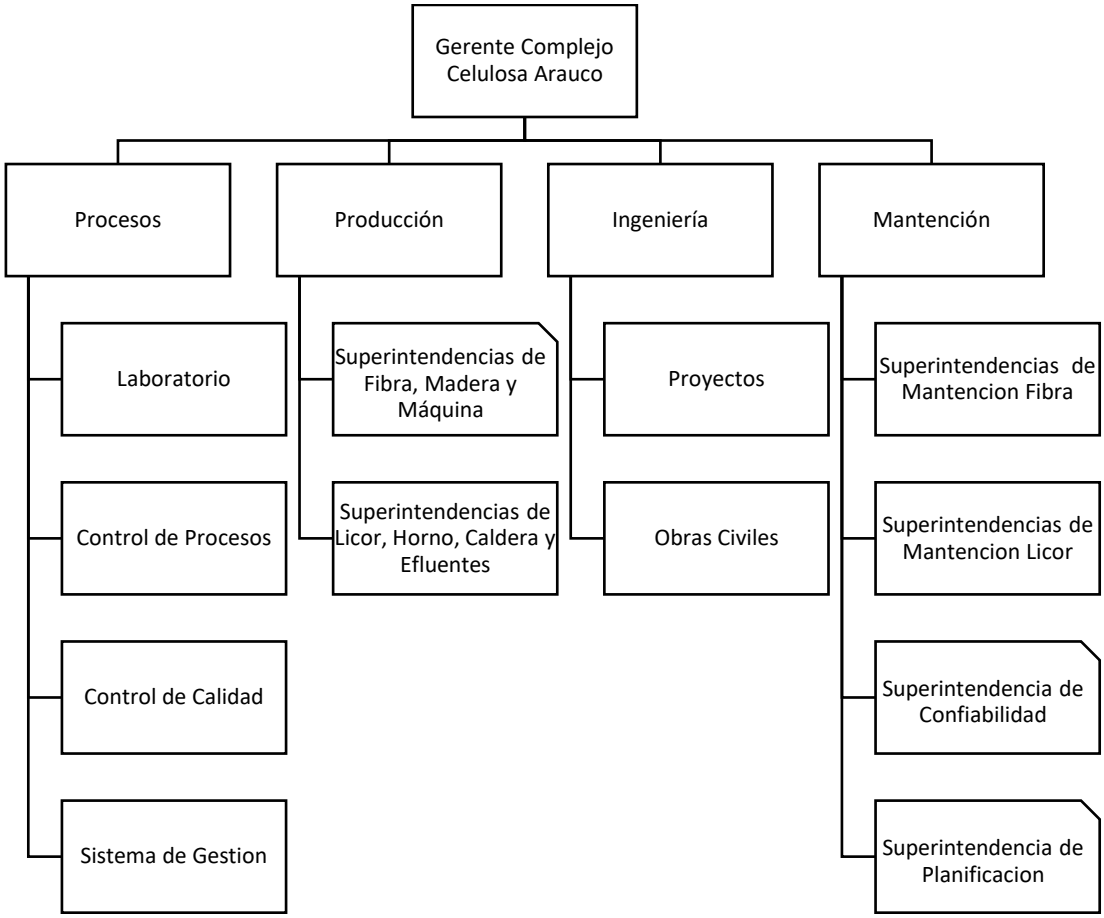


Figura 13. Organigrama Complejo Celulosa Arauco, Horcones.

Los puestos de trabajo enmarcados con negro y con la esquina superior cortada, tienen directa relación con la implementación y desarrollo del plan de mantenimiento basado en confiabilidad, dichas estructuras se exponen a continuación.

1) Superintendencia de Confiabilidad

Es el encargado de velar por el cumplimiento de los estándares acordados por el equipo transversal de confiabilidad, el cual coordina estos acuerdos en todas las plantas. Junto con supervisar el desempeño de los Ingenieros de Confiabilidad de las distintas áreas.

Según esto, es el responsable, en planta, de llevar el control, evaluación y gestión del diseño e implementación del plan de RCM en el área máquina, junto con el Ingeniero

de Confiabilidad de Maquina. Este último, es el coordinador de dicho plan, facilitador en Talleres RCM con personal del área, coordinador de tareas, encargado del avance de la presente memoria y tutor del Estudiante Memorista.

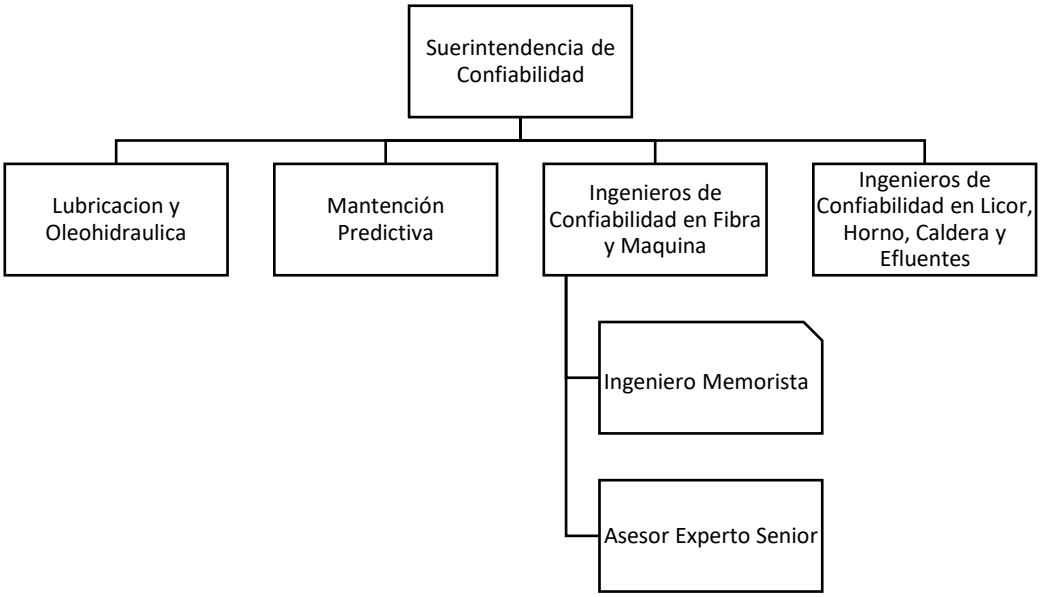


Figura 14. Organigrama Superintendencia de Confiabilidad.

2) Superintendencia de Mantención Máquina

De él dependen el Jefe Mecánico de Maquina y el Jefe Electrocontrol Maquina, los cuales participaron de manera intensiva en pro del correcto desarrollo del Plan de RCM Área Maquina, apoyando tanto con su conocimiento, como con su equipo de técnicos especialistas.

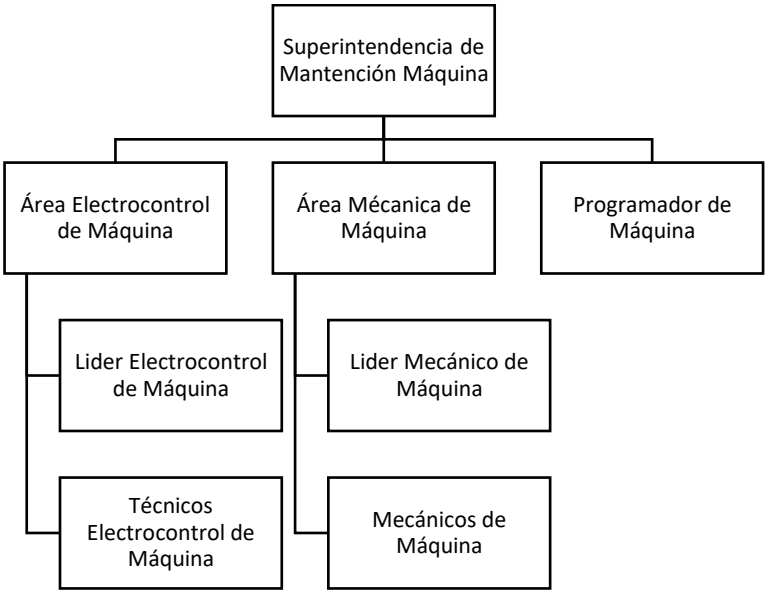


Figura 15. Organigrama Superintendencia de Mantenimiento Fibra, Madera y Maquina.

3) Superintendencia de Maquina

El superintendente es el encargado de la continuidad en la operación del Área Maquina y velar por el cumplimiento de los KPI de producción. Cuenta con Ingenieros Operadores Lideres de Maquina, los cuales apoyaron en los Talleres de revisión del plan RCM, además, 38 Operadores en las distintas etapas del proceso, trabajando en turnos rotativos de horario continuado.

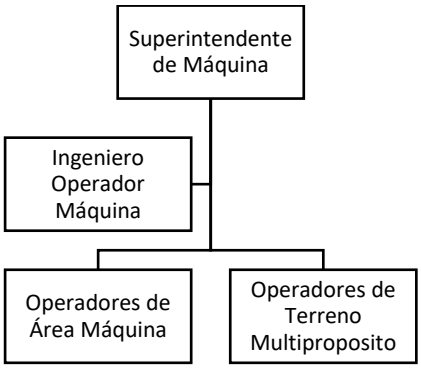


Figura 16. Organigrama Superintendencia de Maquina

2.6.2. Estructura de proceso productivo

La planta cuenta con dos líneas de producción de celulosa paralelas, donde, si bien algunos procesos pueden ser cooperativos, están diseñadas para trabajar de manera independiente. La producción esperada para el año 2019, se expone en la siguiente tabla:

Tabla 10. Producción de celulosa esperada para el año 2019 (Fuente: SIPRO Arauco [28])

	Tipo de Celulosa	**Tiempo de operación** $[día/año]$	**Producción diaria** $[Adt/día]$	**Producción anual** $[Adt/año]$
Línea 1	EKP	222	783,43	173.921,46
Línea 2	BKP	233	1.392,28	324.401,24
				498.322,70

Ahora bien, debido a la similitud de caracterizas en la etapa de secado de hoja de celulosa en ambas líneas, dícese de las condiciones de operación y mantenimiento, se realizará una descripción y análisis exhaustivo solo de la línea 2. Mas aun, debido a una próxima expansión del Complejo Arauco Horcones [23] (finales del 2020), en donde se dispondrá de una tercera línea de producción, el Servicio de Evaluación Ambiental del Gobierno de Chile (SEA) dictamino en su Resolución de Calificación Ambiental (RCA) [23], que por condiciones ambientales no pueden operar de manera simultánea línea 1 y línea 3, por lo que la primera, será dejada fuera de servicio, no bien comience a operar la nueva línea.

Como se describió en la sección *La celulosa*, en esta planta se utiliza un proceso químico para la manufactura de la hoja de celulosa, el cual se llama Proceso Kraft. Este consta de los siguientes microciclos y etapas:

1) Producción de hoja de celulosa
    a) Preparación madera

b) Caldera de poder
c) Digestores
d) Lavado y clasificación
e) Des lignificación con oxigeno
f) Blanqueo
g) Maquina

2) Proceso de la Cal
   a) Horno de cal
   b) Caustificación
   c) Digestores
   d) Lavado y clasificación
   e) Des lignificación con oxigeno
   f) Evaporadores
   g) Caldera recuperadora

3) Proceso del Agua
   a) Tratamiento de agua planta
   b) Caldera de poder
   c) Caldera recuperadora
   d) Turbogeneradores
   e) Efluentes

La manera lógica en que se relacionan estos componentes del proceso productivo se expone en el siguiente diagrama.

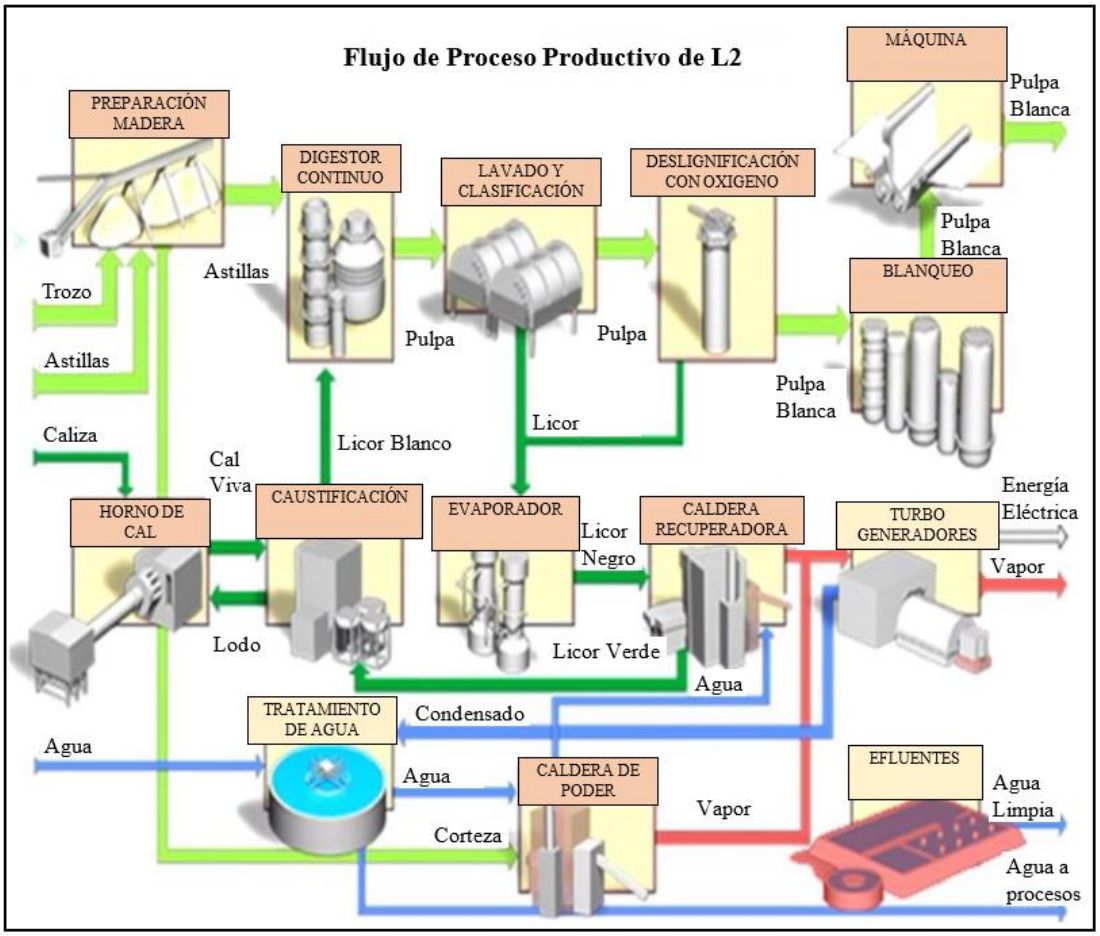


Figura 17. Diagrama de flujo productivo de celulosa con proceso Kraft [15].

El flujo del proceso productivo esquematizado en la *Figura* representa la manufactura de celulosa blanqueada en Línea 2 y se describe de la siguiente manera:

Los rollizos y troncos de madera llegan al Aserradero del complejo, donde se dimensionan y se envían a Preparación Madera. Ahí, la corteza es retirada y transportada a la Caldera de Poder donde se utiliza como combustible de biomasa para suministrar vapor a los Turbogeneradores, de los cuales se obtiene energía eléctrica y vapor para el proceso.

Por otro lado, el trozo de madera es triturado, convertido en astillas (chips) y enviadas al Digestor, el cual tiene como objetivo separar las fibras de celulosa de la lignina. Para

ello las astillas pasan por la etapa de impregnación, en donde se agrega licor blanco al digestor, (el licor blanco es producido en conjunto con el Horno de Cal y la Caustificación, en donde se mezcla y cuecen el licor verde proveniente de la Caldera Recuperadora con la Cal), para luego entrar al proceso de cocción, el resultado final es una pulpa de color café que es derivada al proceso de Lavado y Clasificación.

Ahora bien, es necesario separar la fibra de celulosa del licor negro débil, o licor de cocción residual (que contiene la lignina disuelta, reactivos utilizados en la cocción y elementos solidos derivados de la madera), obteniendo una pulpa café lavada de alta calidad. Sin embargo, aun presenta remanentes de lignina a nivel celular, los cuales serán extraídos en la Deslignificación con Oxigeno, donde, mediante una reacción química oxidante se remueve la lignina con una baja degradación de la fibra de celulosa, para luego, mediante un lavado de la pulpa, se retira la lignina disuelta de las fibras de celulosa.

La celulosa es blanca por naturaleza, sin embargo, la aplicación de oxígeno por más del tiempo requerido comienza a degradar las propiedades de resistencia y rendimiento de la celulosa, por lo que es necesario recurrir a una técnica más selectiva de blanqueo. En la etapa, llamada Blanqueo, la pulpa es sometida a tres ciclos sucesivos de reacciones químicas y extracción de elementos residuales, en los cuales se utiliza dióxido de cloro y dióxido de azufre como reactivo, donde se obtiene como resultado pulpa de celulosa con una blancura acorde a los estándares comerciales del 90%, que se almacena en el tanque de alta densidad blanca, lista para ser secada y empacada en el área Máquina.

La lignina disuelta o Licor Negro débil obtenido como residuo de los procesos de Lavado, Clasificación y Deslignificación con Oxigeno es condensado en los Evaporadores y utilizado como combustible en la Caldera Recuperadora, la cual produce vapor a alta presión para generar electricidad en los Turbogeneradores, y luego al perder presión es utilizado para secar la pulpa de celulosa en el área Máquina. De

esta caldera se reutiliza un residuo llamado Licor Verde, el cual como se mencionó anteriormente, se mezcla y cuece con cal para producir Licor Blanco.

2.6.2.1. Área Maquina

El Área Maquina es la última etapa del proceso, en donde se obtienen fardos de celulosa listos para su comercialización a partir de pulpa de celulosa blanqueada.

Esta etapa de subdivide del siguiente modo:

1) Extremo Húmedo
    a) Sistema de aproximación de pulpa
    b) Formación
        i) Headbox
        ii) Fourdrinier
    c) Prensado
        i) Prensas
2) Extremo Seco
    a) Secado
        i) Secadora
    b) Líneas finales
        i) Cortadora
        ii) Amarradoras
        iii) Unitizadores

2.6.2.1.1. Extremo Húmedo

En la siguiente ilustración, se exponen los principales equipos en el Extremo Húmedo de Área Maquina:

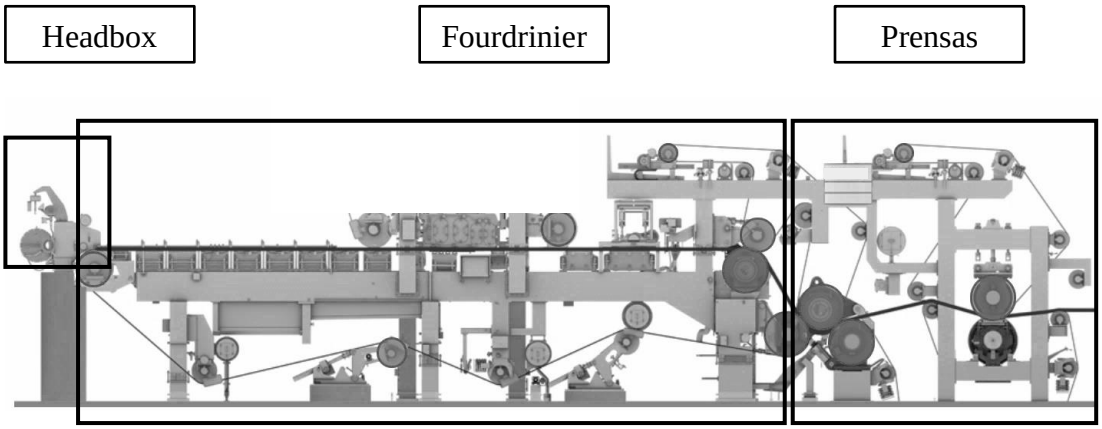


Figura 18. Extremo Húmedo del Área máquina. (Fuente: Valmet [11].)

El Sistema de Aproximación de pulpa comienza en el Tanque de Alta Densidad Blanca (ADB), el cual almacena la celulosa desde la etapa de Blanqueo. Luego, mediante procesos de depuración y clasificación controla los parámetros de la pulpa según, temperatura ($T°$), alcalinidad (pH), consistencia (%) y cloro residual ($\%ClO_2$), una vez alcanzados los valores ideales de producción, es bombeada al Cajón de Alimentación.

El Cajón de alimentación o Cajón Cabeza (Headbox) es el encargado de extender de manera uniforme la pulpa a lo ancho de la maquina (CMD: Cross Machine Direction). Esto lo realiza igualando los gradientes de velocidad en la dirección de la maquina (MD: Machine Direction), para lo cual crea una turbulencia controlada en su interior que evita la floculación de la fibra y finalmente descarga un flujo constante por la abertura del labio, de modo que la pulpa se deposite en la tela del Fourdrinier con el ángulo y velocidad correcta.

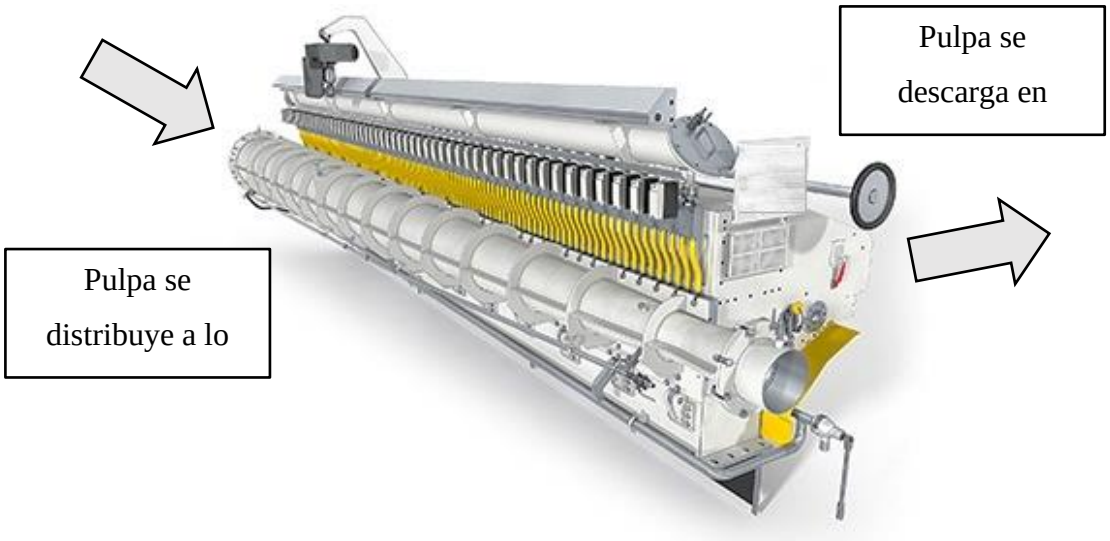


Figura 19. Cajón de Alimentación "Headbox" (Fuente: Valmet [11])

Ahora bien, el Fourdrinier es el encargado de transformar una suspensión acuosa diluida de fibras en una hoja de celulosa, para esto es necesario aumentar la consistencia de la celulosa del $1[\%]$ al $20[\%]$.

La formación de la hoja se realiza sobre una malla plástica continua (tela del Fourdrinier), a través de la cual se drena el agua, primero por acción de la gravedad (zona de formación) y luego de manera inducida mediante un sistema de vacío (zona de succión).

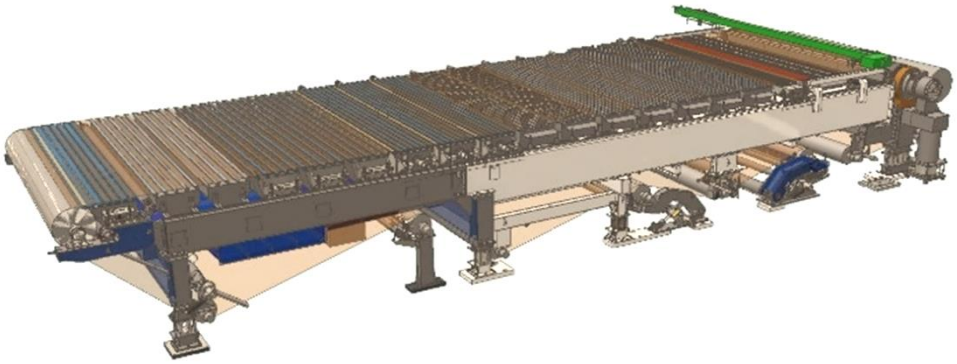


Figura 20. Fourdrinier (Fuente: Valmet [11])

A continuación, en la etapa de prensado, una vez consolidada la hoja de celulosa se aumenta la consistencia de un 20[%] al 50[%]. La eficacia de este proceso depende de la presión realizada, el tiempo de prensado (ancho de la zona de presión, en función del diámetro de los rodillos) y la temperatura de la hoja (aumenta la drenabilidad).

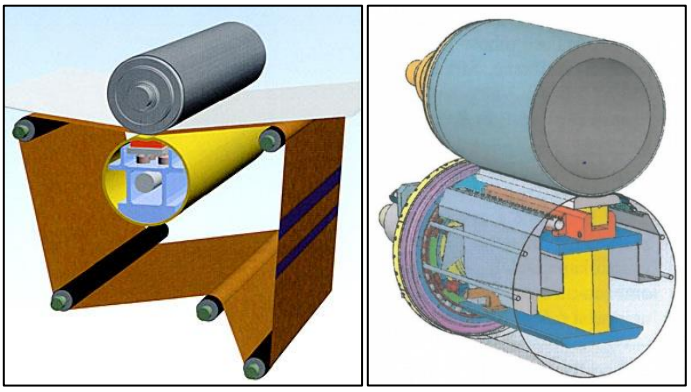


Figura 21. Etapa de prensas (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]).

No bien la hoja de celulosa ha pasado por la etapa de prensas, entra a la secadora, la cual aumenta la consistencia de la pulpa a su valor final de 50[%] al 90[%].

2.6.2.1.2. Extremo Seco

La Secadora de pulpa corresponde a la etapa final de generación de hoja de celulosa, su función es secarla y luego enfriarla, para ser entregada a un seco de $90[\%]$ y a una temperatura de $40[°C]$, parámetros ideales para el proceso de cortado.

Esto se realiza transportando la hoja en su interior de un lado a otro en forma horizontal sobre un colchón de aire, este aire es calentado a través de intercambiadores de calor vapor/aire e impulsado por ventiladores hacia cajas con toberas que forman el colchón de aire.

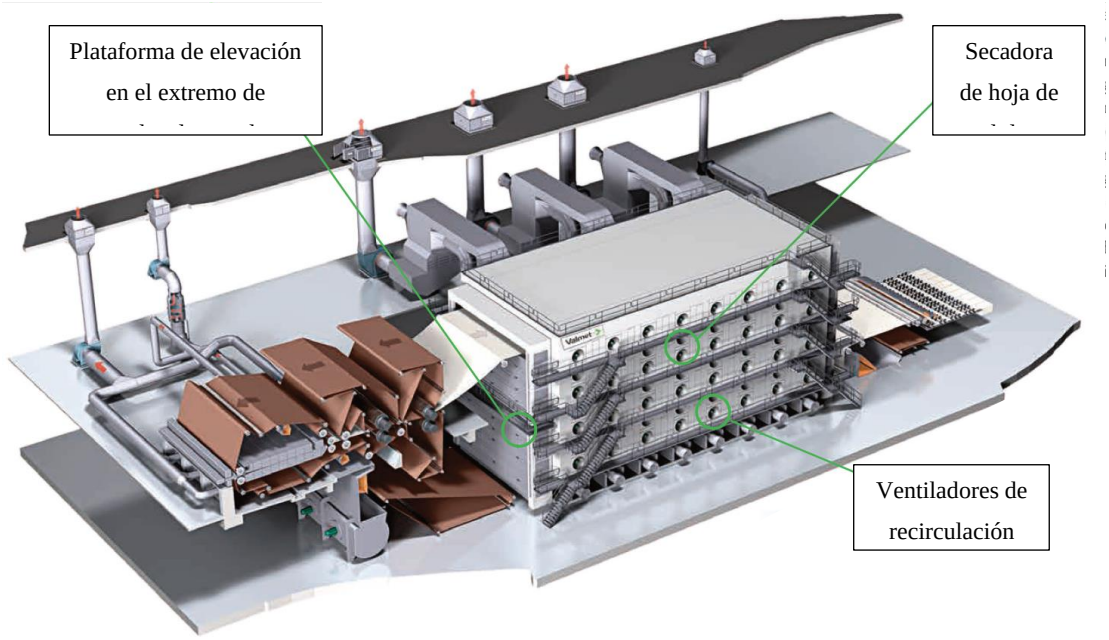


Figura 22. Secadora de hoja de celulosa (Fuente: Valmet [11])

A continuación, la hoja de celulosa, que sale de la secadora con un ancho de $2000[mm]$ es cortada en secciones de $820[mm] \times 690[mm]$ y apilados formando fardos de 253[kg] y $455[mm]$ de altura. Los que a su vez se agrupan en unidades de exportación, que se componen de 2 columnas de 4 fardos cada una.

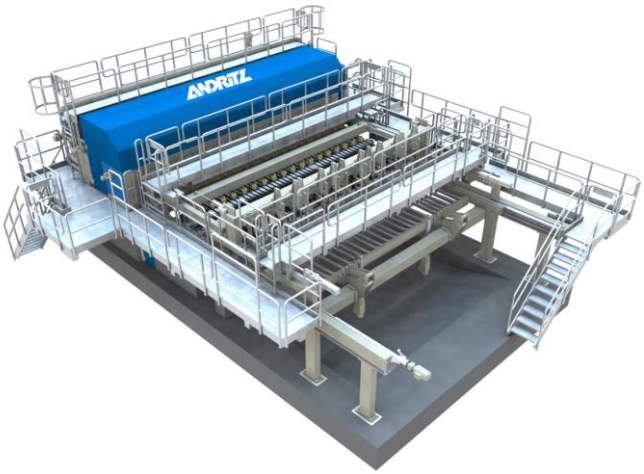


Figura 23. Cortadora de celulosa en líneas finales (Fuente: Andritz [10]).

Por último, estos fardos son prensados, empacados y unificados en columnas de 4 unidades, para finalmente ser almacenados en bodega listos para ser comercializados.

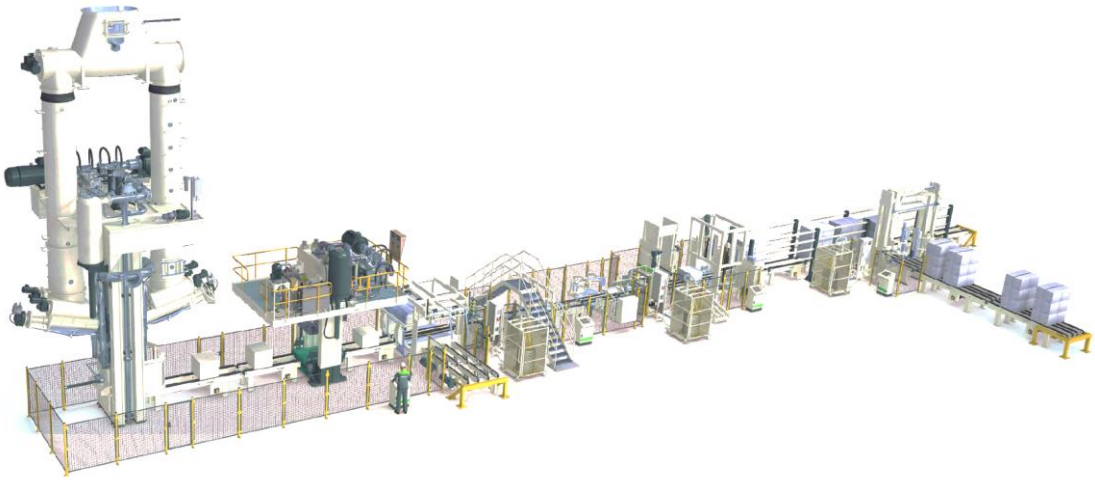


Figura 24. Líneas finales del Área Maquina, prensa de fardos y unitizador (Fuente: Valmet [11]).

3. Secado de hoja de celulosa

Se define secado, como la separación total o parcial de un líquido desde un material solido por aplicación de calor. Sin embargo, esto suele ser costoso, por lo que se recomienda utilizar otros métodos previos y reducir su humedad al máximo, esto se puede realizar con procesos mecánicos, tales como, filtrado, centrifugado, absorción, adsorción, entre otros.

Otra circunstancia en la que se busca separar un líquido de un sólido es la vaporación, que, a diferencia del secado, el líquido se elimina por ebullición, en este método el producto a secar suele tener más fluido que sólido, al contrario que en el secado.

La hoja de celulosa debe ser secada para preservar su calidad, además de facilitar su manejo, reducir su peso y por lo tanto su costo de embalaje. Aun, cuando esta es repulpada por el cliente, resulta más económico secarla por métodos térmicos que transportarla húmeda.

Dicho esto, la función principal del Área Máquina es remover el agua presente en la pulpa de celulosa, para esto se utilizan tres métodos distintos, expuestos a continuación según su orden secuencial en el proceso:

- Succión:

  La pulpa es depositada homogéneamente sobre la tela del Fourdrinier, que funciona como filtro, manteniendo sobre esta las fibras de celulosa. Debajo de la tela, se disponen una serie de cajas de succión que aspiran el agua presente en la pulpa a través de la membrana, la potencia de succión (vacío) aumenta progresivamente en la dirección que avanza la pulpa.

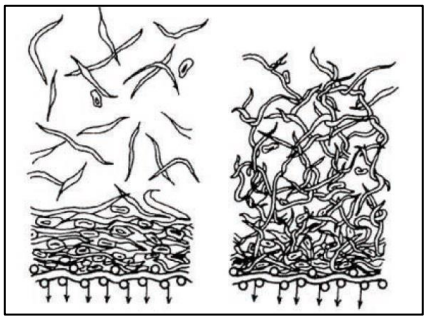


Figura 25 Aumento de consistencia de la celulosa debido al agua drenada por la tela filtrante del Fourdrinier (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]).

Este sistema de vacío está compuesto por bombas y separadores de agua, que crean un diferencial de presión negativo, respecto a la presión atmosférica, mediante el cual remueven el agua contenida en la pulpa de celulosa.

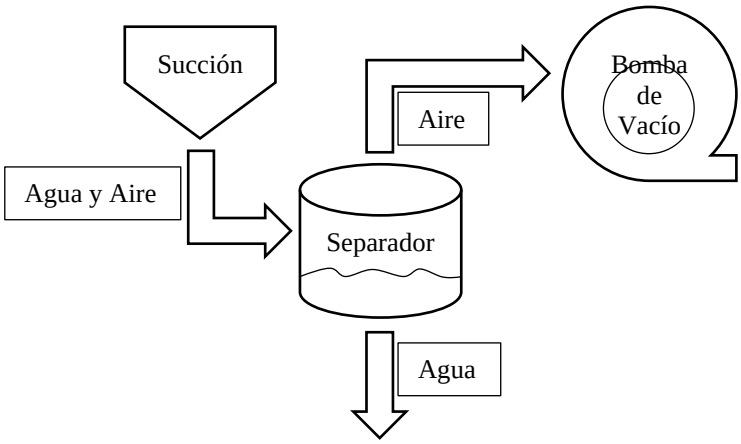


Figura 26 Diagrama de flujo de sistema de vacío

- Compresión mecánica:

  A la salida del Fourdriner, la celulosa debe tener la consistencia y resistencia a la tracción necesaria para soportar las fuerzas involucradas en la etapa de prensas. En esta etapa la hoja de celulosa es estrujada mediante dos rodillos, de modo que se satura de agua y libera el agua restante, siendo succionada por los rodillos y absorbida por los paños de las prensas.

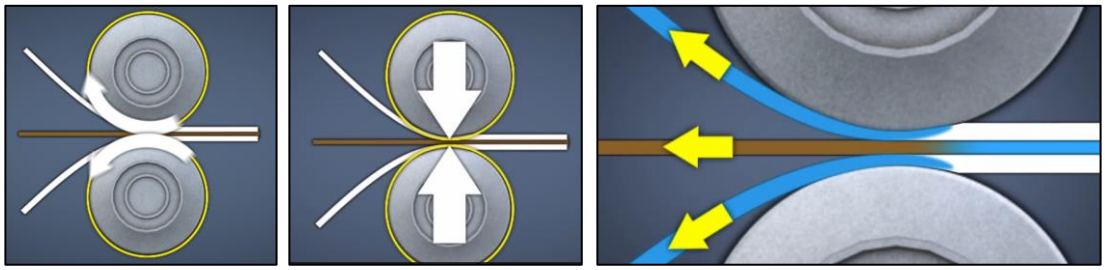


Figura 27. Extracción de agua de la hoja de celulosa mediante compresión mecánica (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]).

- Evaporación:

  Después de las prensas, la hoja de celulosa entra a una cámara de secado (la secadora) de calefacción directa, es decir, el aire caliente pasa directamente por la celulosa, transfiriendo el calor por convección. El aire es calentado por serpentines de vapor, ya que es más económico que la electricidad y más limpio que gases o humos residuales.

  Su funcionamiento es del tipo continuo, la hoja de celulosa se mueve al interior de la secadora, cabe mencionar que, en los equipos de secado continuo, las condiciones en cualquier punto, de humedad y temperatura, se mantienen constantes en el tiempo.

  Se utiliza este método debido al gran volumen de material que se debe secar, este debe ser secado lentamente y a temperatura controladas, ya que su exposición a temperaturas más altas daña las fibras de celulosa, volviéndolas frágil y quebradizas, disminuyendo el largo de estas, característica la cual es medida y determina la calidad de la celulosa.

Tabla 11. Agua evaporada desde la hoja de pulpa de celulosa en la secadora.

	Capacidad máx.	**Promedio real**	**Unidad**
Velocidad	180	160	$[m/min]$
Capacidad	1500	1392	$[Adt/dia]$
Agua removida	55329	49181	$[kg/h]$

La energía requerida para evaporar aquella masa de agua, considerando un calor latente de $2257[kJ/kg]$, es de $111[GJ/h]$. Ahora bien, como se mencionó, el aire se calienta con vapor, el cual es generado en la caldera suministrada de corteza y astillas de pino y eucalipto como combustible.

Considerando un poder calorífico promedio de estos árboles de $18420[kJ/kg]$, se requieren $6026[kg/h]$ de madera que alimenten el fogón de la caldera y se genere el calor necesario para evaporar $49181[kg/h]$ de agua de la hoja de celulosa.

Por otro lado, como el calor es suministrado a los serpentines a $10[bar]$, con un calor latente de $2000[kJ/kg]$, se suministran $55[t/h]$ de vapor a la secadora.

La relación de costo especifico por kilogramo de agua removida se expone cualitativamente en el siguiente gráfico:

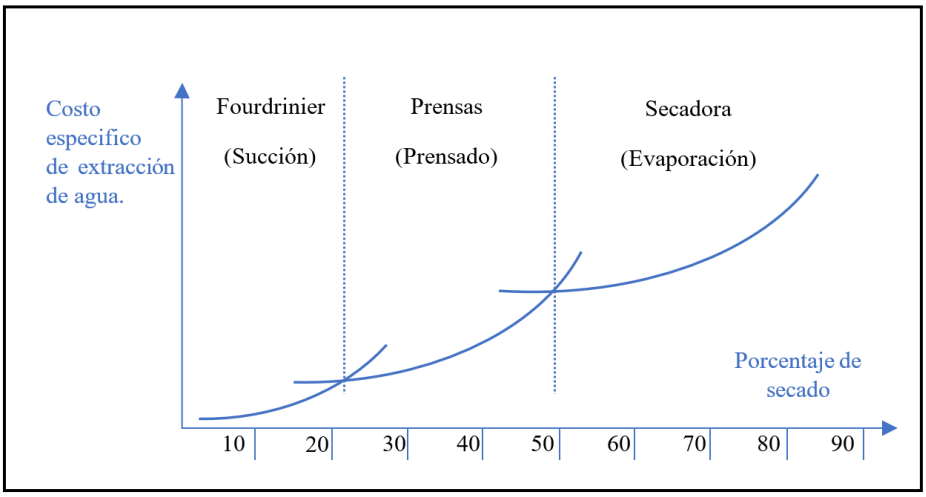


Gráfico 7. Costo especifico de extraer el agua de la hoja de celulosa, por el kilogramo de agua retirado en relación cualitativa con el porcentaje de secado (Fuente: Producción de celulosa Kraft [7]).

3.1. Antecedentes generales de la etapa de secado de hoja de celulosa

El activo fijo principal de esta etapa es la Secadora, siendo también la de mayor tamaño en el área máquina, su disponibilidad es crítica para el proceso, ya que económicamente

es inadmisible contar con un equipo de estas características en stand-by. Por otro lado, controla la capacidad de producción de la planta, es un cuello de botella, cualquier aumento a su disponibilidad incide directamente con el aumento de producción, vale decir, ingresos por ventas a la empresa.

Figura 28 Secadora de hoja de celulosa. Imagen referencial (Fuente: Valmet [12]).

Área maquina cuenta con una sala de control, donde se monitorean las condiciones del proceso de ambas líneas de manera remota. Las condiciones de operación nominales del proceso se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 12. Datos técnicos de operación de la etapa de secado de hoja de celulosa.

Condición	Valor	Condición	Valor
Capacidad $[ADt/dia]$	1500	Temperatura de entrada $[°C]$	70
Acidez de pasta $[pH]$	5-6	Temperatura máx. al interior $[°C]$	95
Sequedad de entrada [%]	46,5	Temperatura de salida $[°C]$	55
Sequedad de saludad [%]	86	Presión de vapor $[bar]$	10
Evaporación de agua $[kg/h]$	55561	Temperatura vapor saturado $[°C]$	184,1
Ancho de hoja entrada $[mm]$	6605	Calor latente $[kJ/kg]$	1999,28
Ancho de hoja salida $[mm]$	6400	Pot. ventiladores recirculación $[kW]$	265
Gramaje a 100% de seco $[g/m^2]$	840	N° ventiladores recirculación $[-]$	126
Velocidad $[m/min]$	25-200		

Estas variables nominales varían en función de la velocidad de la hoja, que en condiciones normales es de $150[m/min]$, la cual, a su vez, depende de la capacidad de producción de las áreas que la preceden, siendo el Digestor el equipo que marca el ritmo en línea 2 con una velocidad de $15[rpm]$.

3.1.1. Secadora Fläkt modelo FCLC C-7219

La Secadora usada en línea 2, es de marca Fläkt modelo FLCL C-7219 y sus dimensiones son; $13530[mm]$ de alto, $11000[mm]$ de ancho y $35560[mm]$ de largo.

La secadora se encuentra apoyada sobre un marco de vigas de acero fundidas sobre la base de hormigón.

La estructura de secado se encuentra dividida en 20 secciones verticales, donde cada sección tiene ventiladores de recirculación que impulsan el aire hacia las cajas sopladoras, estas mantienen la hoja sobre un colchón de aire, aire el cual, es calentado en un intercambiador de serpentines vapor – aire.

La hoja de celulosa entra a la Secadora desde un extremo superior y la recorre de manera zigzagueante hasta la parte inferior del otro extremo, esto es posible gracias a rodillos de retorno ubicados en la entrada y salida, que permiten el cambio de dirección

de la hoja en $180[°]$. Estos están ubicados sobre torres con cojinetes y son accionados mediante transmisión de cadena, con un accionamiento en común ubicado en la parte inferior, sin embargo, este es utilizado solo en la etapa de puesta en marcha, ya que en operación normal la fuerza necesaria para hacer avanzar la pulpa a través de la secadora es provista por la presión y tracción ejercida por dos rodillos dispuestos a la salida de esta.

La pulpa se seca al evaporar el agua contenida entra sus fibras al obtener calor desde el aire de recirculación que la mantiene unos milímetros más arriba de las cajas sopladoras inferiores.

No obstante, la hoja debe ser enfriada antes de la siguiente etapa, donde es cortada a su tamaño de comercialización. Aquella acción la realiza una serie de cuchillos transversales y longitudinales que requieren una humedad y temperatura adecuada para realizar cortes limpios y no perder su filo en el proceso.

Ahora bien, en la cubierta inferior de la secadora es donde se enfría la hoja, en esta sección el aire no pasa por intercambiadores de calor, sino que es suministrado directamente desde el edificio a una temperatura aproximada de $25[°C]$.

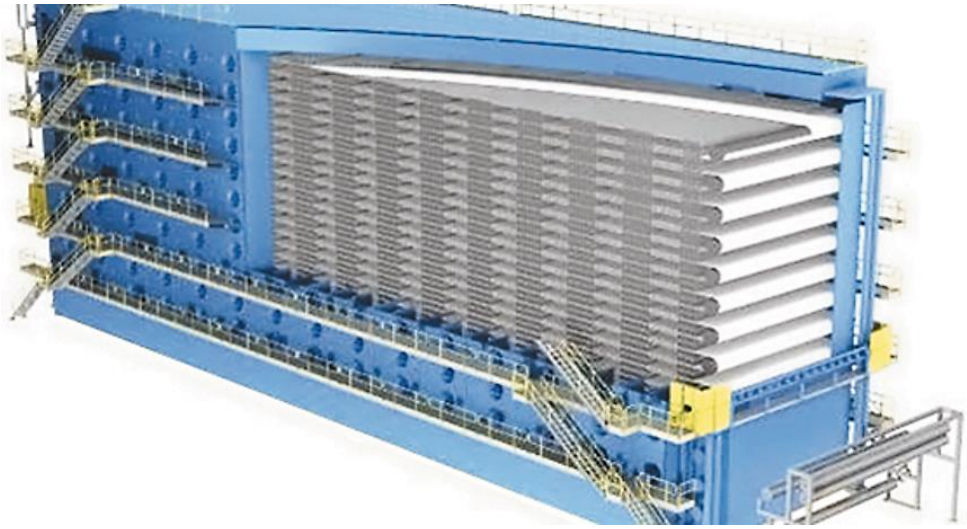


Figura 29. Secadora de hoja de celulosa. Imagen referencial (Fuente: Andritz [10]).

En el extremo de entrada la hoja pasa por un rodillo equipado con celdas de carga (Pressductor®) que miden la tensión ejercida a la hoja por los rodillos ubicados a la salida, mediante este parámetro se regula la velocidad y fuerza de tracción de dichas unidades.

Para fines de inspección y mantenimiento la estructura cuenta con pasarelas al largo de cada lado de la secadora, a estos pasillos también se encuentra adosada la línea de vacío, que se utiliza pare conectar un sistema de aspirado, con el objetivo de realizar una limpieza al interior y exterior de la secadora, donde se acumula polución de pulpa.

Por otro lado, la etapa de secado también cuenta con dos sistemas de recuperación de calor, donde se utiliza el aire caliente y húmedo retirado de la secadora para precalentar el aire fresco que ingresa a la secadora mediante intercambiadores de calor aire-aire. Este sistema de tal modo que al interior de la secadora siempre exista un diferencial de presión negativo, para que al abrir las puertas de inspección no se pierda aire caliente.

En este estudio también se analizará el sistema de condensado que recolecta el agua condensada, a partir del vapor que transfiriere su calor latente al aire de recirculación al interior de la secadora.

De manera complementaria, a la salida de la secadora se encuentra el pozo que recibe la hoja de celulosa cuando esta no posee las caracterizas apropiadas para continuar a la siguiente etapa o por condiciones de operación. Este pozo cuenta con un sistema que suministra agua y desgarra la pulpa de celulosa con un agitador, de manera que se pueda repulpar y recircular hacia el proceso.

3.1.2. Rodillos de Retorno

Los rodillos de retorno permiten el cambio de dirección de la hoja de celulosa en la de entrada y salida de la secadora, de modo que pase de un nivel superior a otro inferior. Estos consisten en un total de 21 rodillos, 11 en la entrada y 10 en la salida.

La estructura de la secadora consta de bastidores en sus extremos, los cuales son de acero estructural y van montados en la fundación de la secadora. Los rodillos descansan sobre la torre, siendo accionados por un sistema de transmisión por cadenas con su sistema motriz ubicado a nivel del piso, cabe mencionar, que estos son impulsados solo en la etapa de enhebrado de hoja. Además, el trabajo de mantenimiento en los rodillos giratorios puede ser realizado a través de escotillas de servicio ubicadas en la entrada y salida de la secadora.

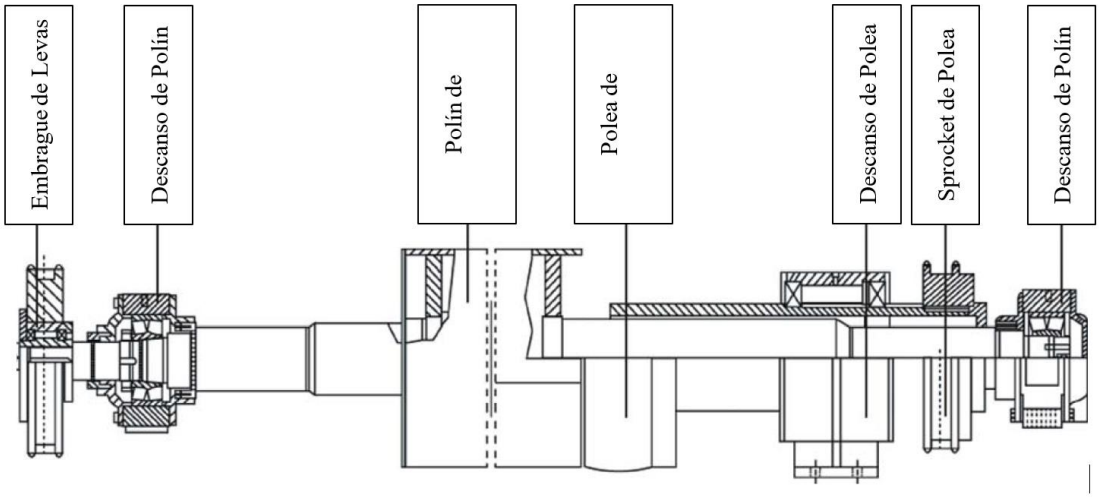


Figura 30. Rodillo de Retorno (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

3.1.2.1. Embrague de levas

Transmite el movimiento a los rodillos de retorno en etapa de enhebrado de hoja. Es accionado mediante transmisión por cadena, se utiliza una rueda dentada doble (sprocket), la cual cumple la función de rueda conductora del rodillo superior contiguo y conducida del rodillo inferior.

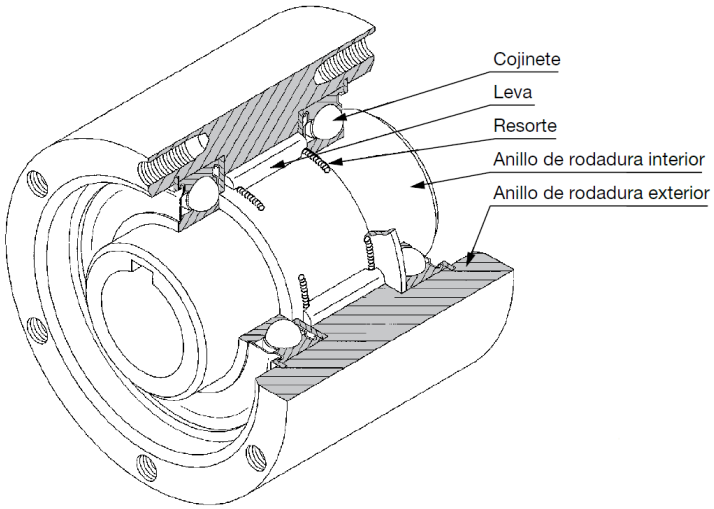


Figura 31. Piezas y componentes principales de un embrague de levas (Fuente: Tsubaki cam clutches: Ruedas libres [9]).

El movimiento es transferido al eje del polín por un sistema interno de trinquete, este trasmite el movimiento siempre y cuando la velocidad producto de la fuerza motriz ejercida por la hoja de celulosa al polín sea menor que la ejercida por la transmisión por cadena. Esto ocurre debido a la fuerza centrífuga y como son utilizadas en los procesos de puesta en marcha, se suelen llamar “ruedas de despegue”.

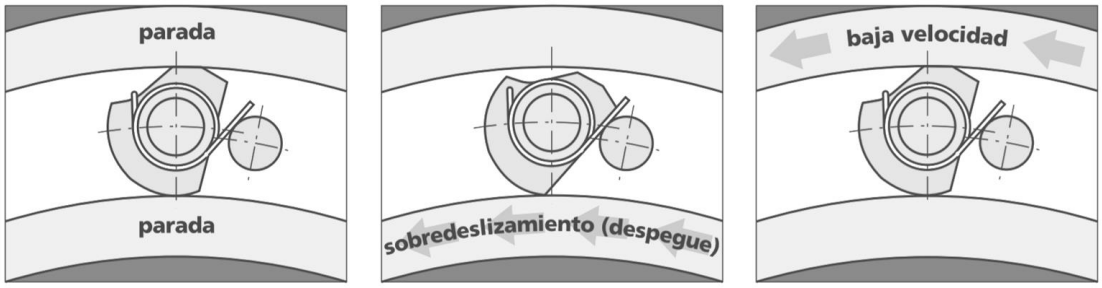


Figura 32. Funcionamiento embrague de levas (Fuente: Tsubaki cam clutches: Ruedas libres [9]).

3.1.2.2. Polea de cinta de enhebrado

La polea tiene como función impulsar la cinta de enhebrado, la cual guía la punta de hoja de celulosa a través de la secadora en la etapa de puesta en marcha, para esto posee una superficie moleteada, de modo tal que su rugosidad no permita de la cinta de deslice en la polea. Esta tiene un accionamiento distinto al del polín del rodillo de retorno, por lo que gira de manera independiente.

Está fijada en el bastidor de los extremos y ejerciendo contacto con el eje del polín a través de dos rodamientos. Debido a esto es susceptible a desalineamiento, por lo que se debe llevar un control periódico de sus tolerancias, una desviación de esta podría ocasionar roce y catapultar con bloqueo del cilindro provocando una detención de la secadora, es decir, la producción.

3.1.2.3. Accionamiento rodillos de retorno

El accionamiento de los rodillos de retorno se realiza a través de un sistema de transmisión complejo que se divide en dos partes principales, el accionamiento de los polines mediante los embragues de levas y el accionamiento de las poleas de cinta de enhebrado.

En ambos casos la fuerza motriz es ejercida por un motor eléctrico, los cuales poseen variador de frecuencia y un sistema de control remoto donde se monitorean sus variables, tales como, potencia, corriente y vibraciones.

El movimiento de rotación es transmitido por una secuencia de transmisión que trabaja de la siguiente manera:

Motor Eléctrico - Reductor de Engranajes – Cardan – Sprocket – Cadena

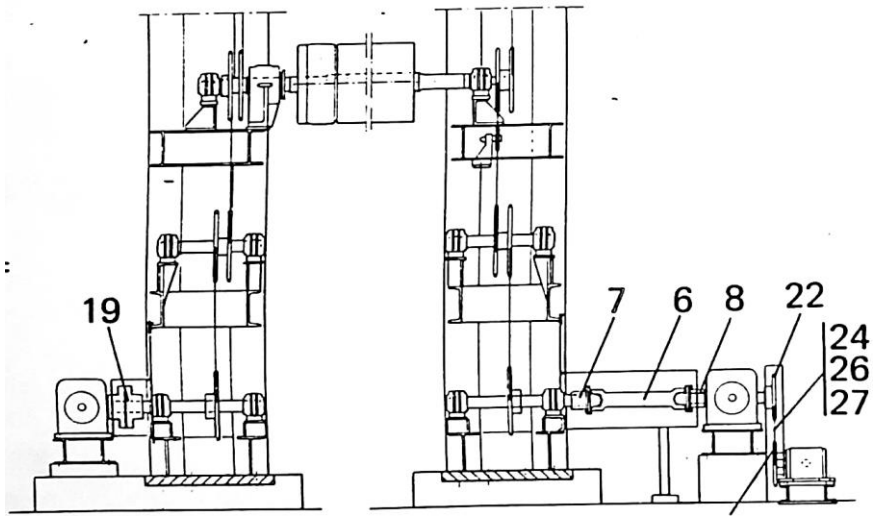


Figura 33. Accionamiento Rodillos de Retorno de Salida (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

Sin embargo, el accionamiento de los polines posee un reductor de engranajes recto de doble salida, por una acciona los rodillos de retorno de salida y por la otra transmite movimiento a un eje cardiaco que recorre todo el largo de la secadora hacia los rodillos de retorno de entrada a esta.

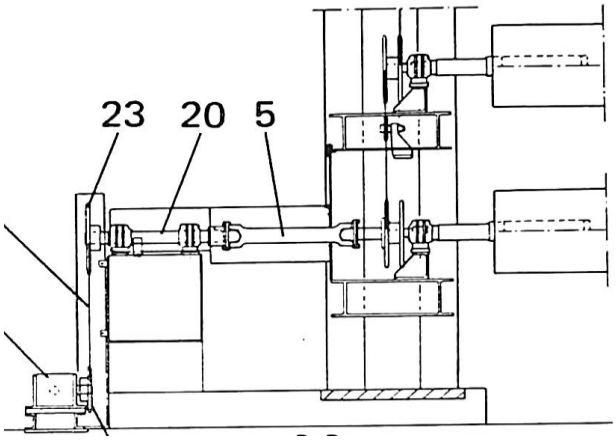


Figura 34. Accionamiento Rodillos de Retorno de Entrada (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

3.1.3. Dispositivo de entrada a la secadora

A la entrada de la secadora se encuentran dos rodillos que trabajan en conjunto para controlar y medir la tensión en la hoja de celulosa, con el fin de que esta no genere tacos ni se corte al interior de esta.

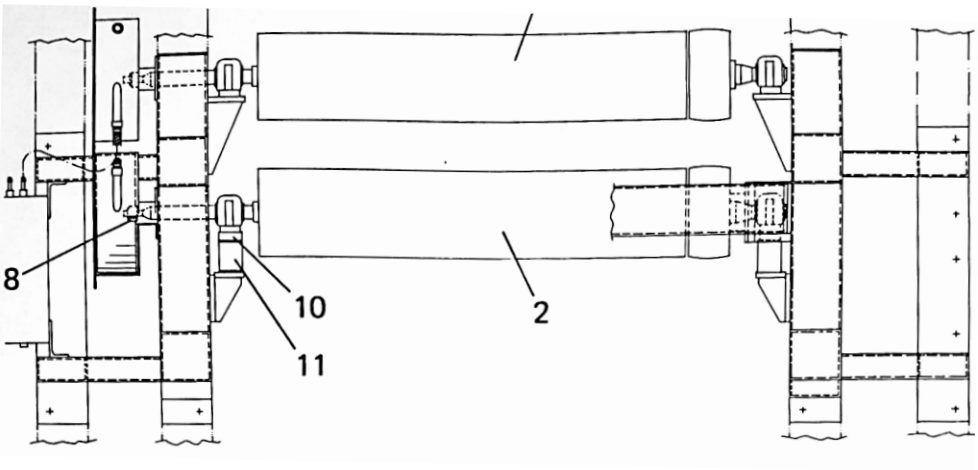


Figura 35. Dispositivo de entrada a la Secadora (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

Además, cuenta con un sistema con cilindros neumáticos que se utilizan para desplazar la punta de hoja de celulosa desde la polea de enhebrado al polín en la puesta en marcha.

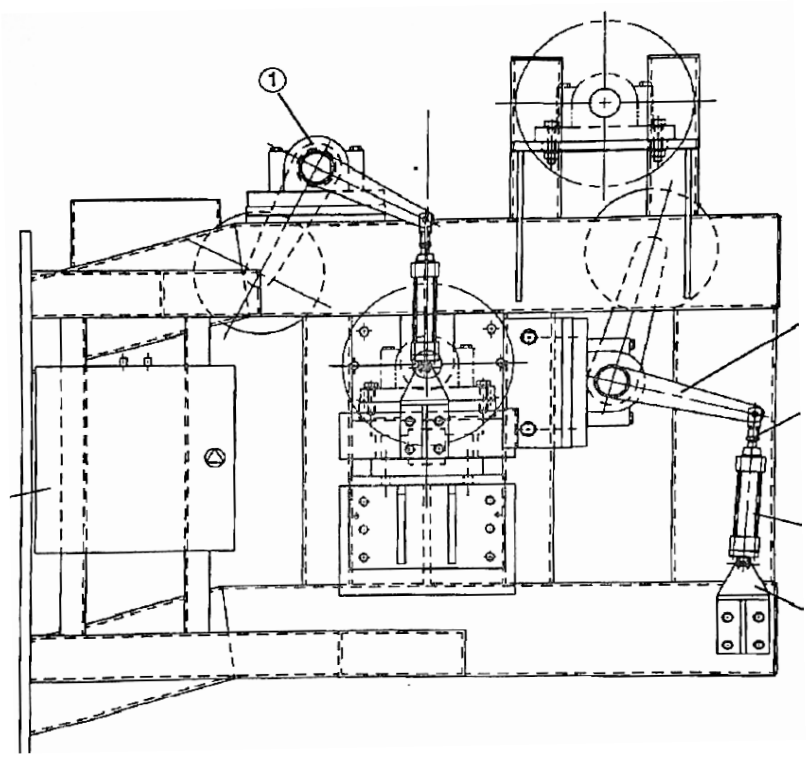


Figura 36. Unidad de accionamiento neumático y celda de carga de dispositivo de entrada a la secadora (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

Para medir la tensión y presión en la hoja de celulosa se utiliza una celda de carga del tipo Pressductor® ubicada en la base de los descansos de los rodillos, el movimiento físico en las celdas y el transductor incorporado, generan una señal de medición eléctrica proporcional a la carga mecánica aplicada.

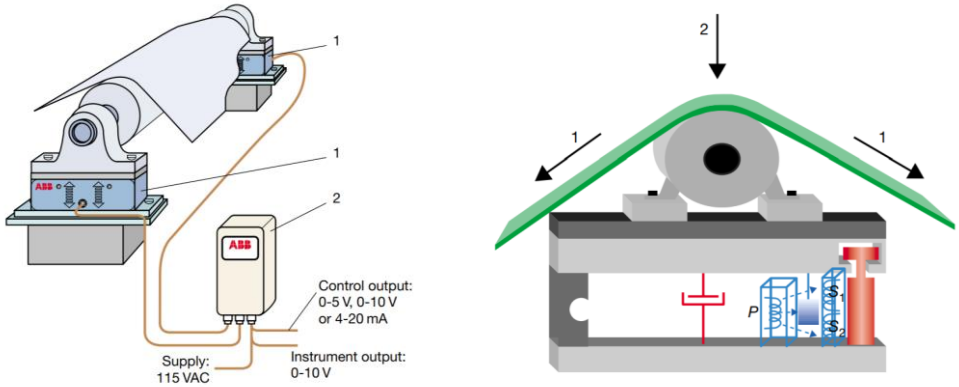


Figura 37. Celdas de carga para medir condiciones reales de operación (Fuente: ABB [30]).

3.1.4. Sistema de cinta de enhebrado

Este sistema permite el enhebrado de la hoja de celulosa después de una detención o corte de hoja al interior de la secadora.

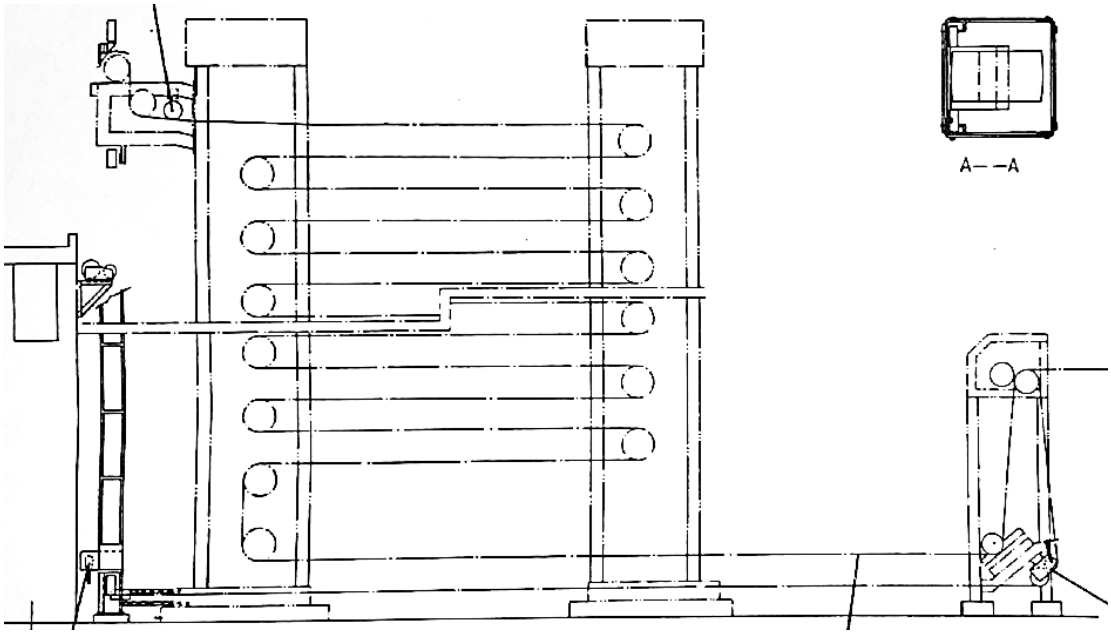


Figura 38. Sistema de enhebrado de hoja de celulosa en la secadora (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

Consta de una cinta doblada que recorre toda la secadora apoyada sobre las poleas de cinta de enhebrado a un extremo de los rodillos de retorno. Un dispositivo desplegador de cinta la abre en la entrada y salida de la secadora para que el operador pueda introducir y retirar, respectivamente, la punta de hoja de celulosa en la etapa de enhebrado.

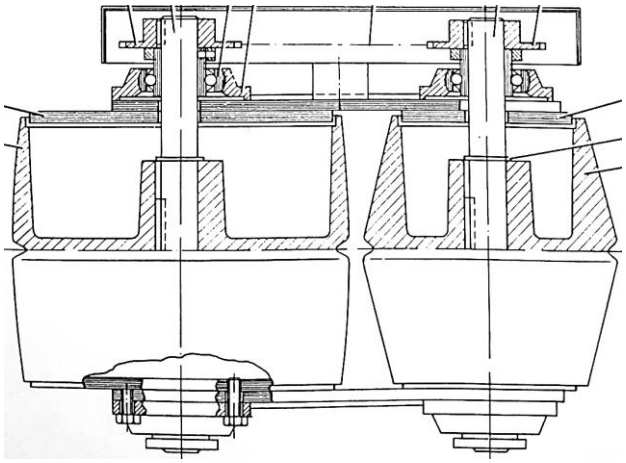


Figura 39. Poleas desplegadoras de cinta de enhebrado (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

La cinta debe tener una tensión idónea para realizar su función, esto se logra con una torre vertical provista de contrapesos regulables que permiten suministrar la tensión necesaria.

3.1.5. Sistema de cajas sopladoras y recirculación de aire

El sistema de recirculación de aire cumple dos funciones principales, la primera, como su nombre lo dice, es recircular el aire al interior de la secadora, sin embargo, no solo lo recircula, también lo calienta, en la succión se encuentran unos serpentines de vapor que entregan su calor latente al aire que lo circunda, y su segunda función es impulsar el aire a través de las cajas sopladoras que mantienen la hoja de celulosa flotando sobre un colchón de aire.

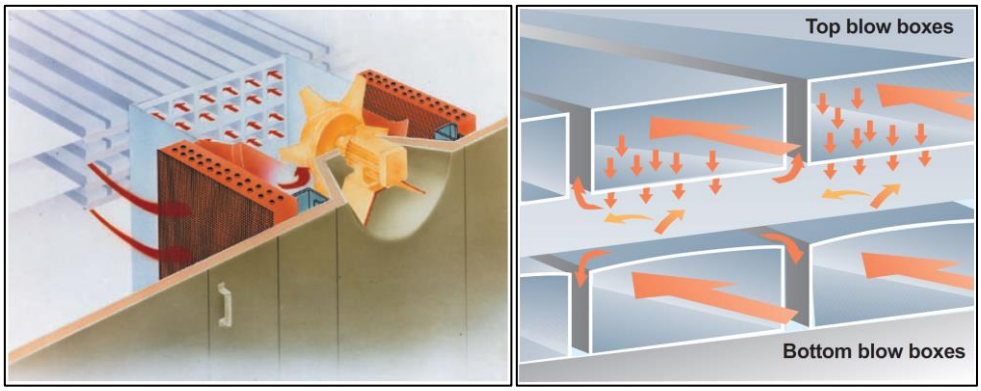


Figura 40. Recirculación de aire y Cajas sopladoras (Fuente: Fläkt Dryer, Andritz [10]).

Este sistema aumenta la transferencia de calor por convección, ya que el aire pasa a través de la hoja de celulosa, aumentando la eficiencia del secado.

Como el aire caliente, aumenta su humedad al pasar por la hoja de celulosa, este disminuye su densidad y se enfría levemente al calentar el agua de la hoja que pierde cuando se evapora, por lo que sube a la siguiente bandeja de la secadora. En la bandeja superior, el aire de secado vuelve a pasar por la carga para ser calentado a la temperatura máxima permitida y poder albergar mayor humedad.

El ventilador de recirculación funcionada de manera continuada y es impulsado mediante un motor eléctrico de rodamientos sellados y acoplado directamente a un rodete del tipo axial con un ducto de aspiración radial. La secadora cuenta con 126 ventiladores de este tipo, distribuidos en 10 columnas por cada lado y con 6 ventiladores cada una, mas 2 secciones finales, una a cada lado, con 3 ventiladores cada una.

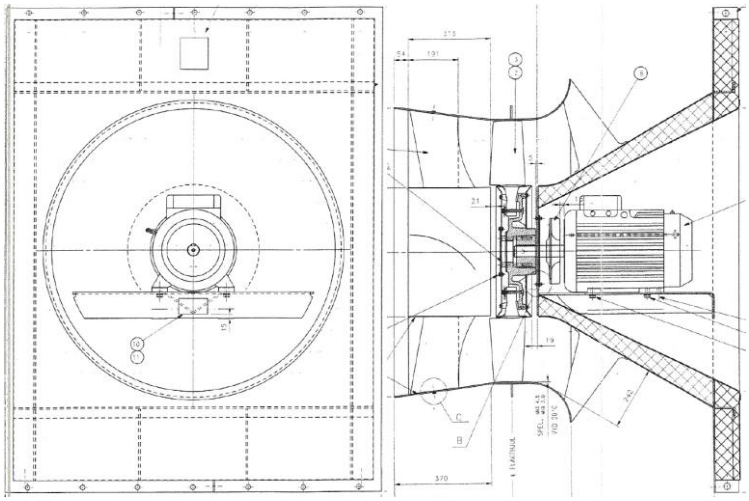


Figura 41. Ventilador de Recirculación (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

Las cajas sopladoras cuentan con un sistema de accionamiento que las levanta cuando se requiere realizar una inspección o retirar residuos atrapados al interior de esta debido a un corta de hoja al interior de la secadora.

El sistema de levante consiste en 20 cilindros hidráulicos, 10 en cada lado del secado, que mediante cadenas y sprocket traccionan barras verticales en las cuales se encuentran acopladas las cajas sopladoras.

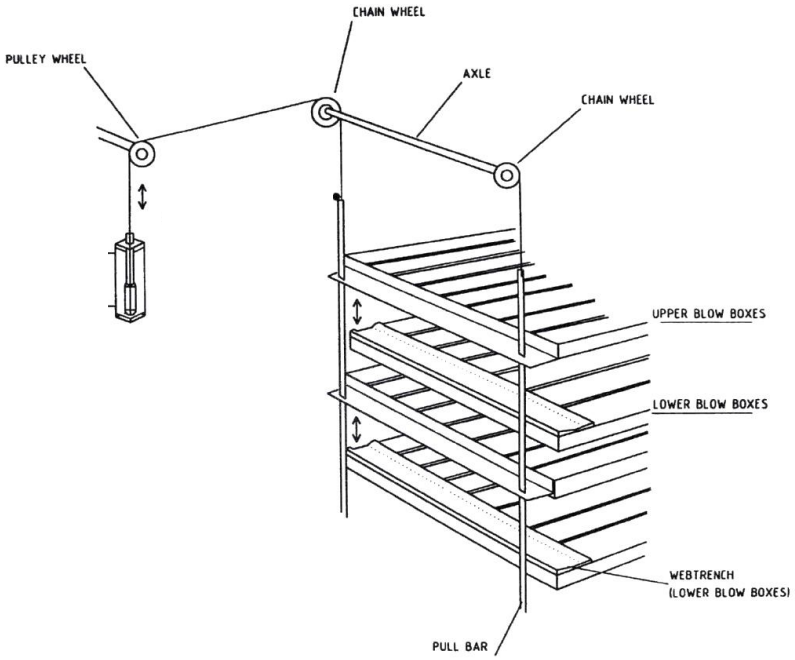


Figura 42. Esquema de sistema de levante de cajas sopladoras (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

3.1.6. Sistema de extracción de aire y recuperación de calor

El aire reposición entra al sistema de recuperación de calor desde el exterior a temperatura y humedad relativa ambiente, impulsado por dos ventiladores de tiro forzado, donde es precalentado en un intercambiador de tubos con el aire húmedo y caliente que sale de la secadora. El aire al aumentar su temperatura a humedad absoluta constante disminuye su humedad relativa, de modo que pueda secar la celulosa en función de dos características; entregar calor a la hoja, suscitando la evaporación del agua y contener en su interior el vapor generado al tener poseer menor humedad relativa.

El aire precalentado se suministra a la secadora por la penúltima bandeja inferior, donde pasa nuevamente por intercambiadores de serpentines que lo calientan, pero esta vez con vapor. Al secar la hoja de celulosa aumenta su humedad, disminuyendo su

densidad, lo que lo impulsa hacia la parte superior de la secadora ayudado por ductos en el techo conectados a ventiladores de tiro inducido.

Ahora bien, la hoja de celulosa debe ser enfriada antes de salir de la secadora, para reducir su humedad relativa y no vuelva a captar humedad al enfriarse en el ambiente, más aun, según las condiciones de operación de la cortadora, la celulosa debe estar a $40[°C]$.

.

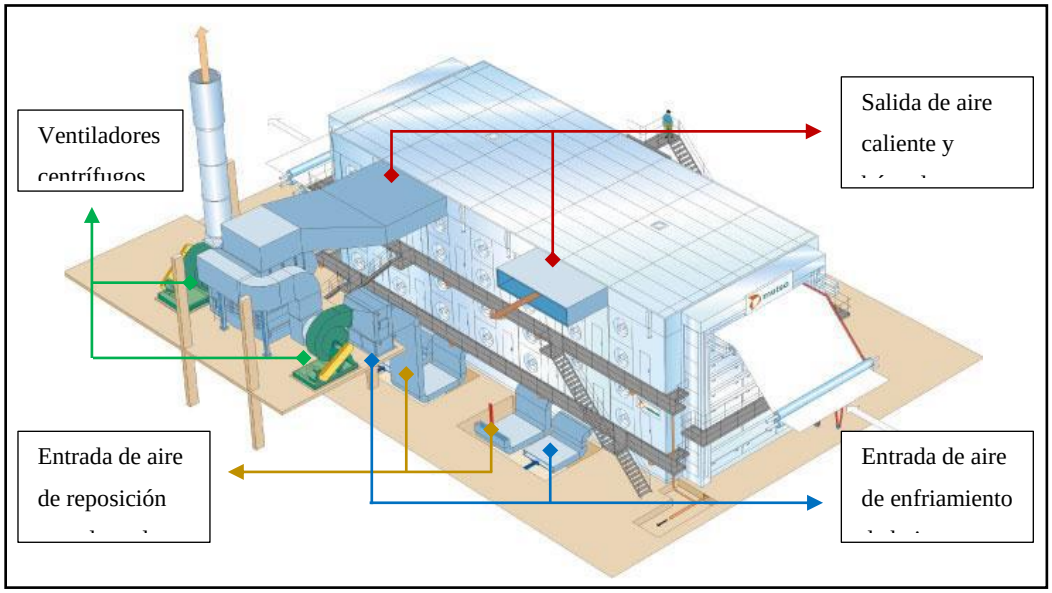


Figura 43 Sistema de complementario de suministro de aire en la secadora (Fuente: Mantención Mecánica: Secadora de Pulpa [8]).

Además, para aumentar la eficiencia térmica del proceso, luego de pasar el aire húmedo extraído por el intercambiador, este circula por un estanque al cual se le suministra agua a través de duchas. En esta etapa, el aire caliente húmedo que sale de la secadora se enfría a la temperatura de roció o bulbo húmedo, alcanzando una humedad relativa del $100[\%]$, este calor perdido se transfiere al agua calentándola para ser suministrada a otra etapa del proceso, finalmente el aire residual es liberado a la atmosfera.

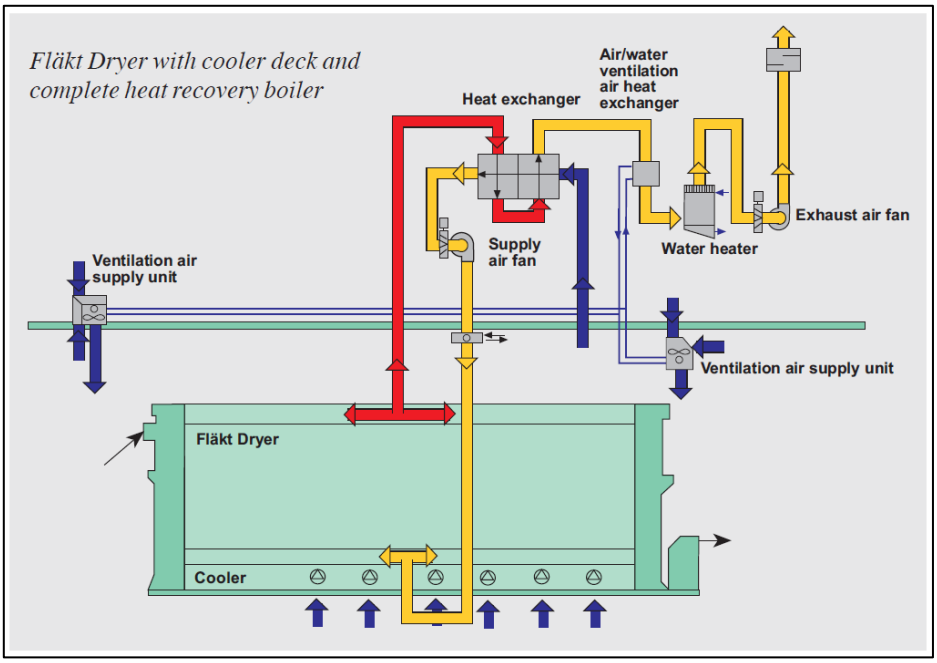


Figura 44. Flujo de aire al exterior de la secadora (Fuente: Fläkt Dryer Andritz, 2011 [10]).

Los cuatro ventiladores mencionados, dos de tiro forzado en la entrada y dos de tiro inducido en la salida, son centrífugos y cada uno impulsado por un motor eléctrico con variador de frecuencia que adapta la velocidad a los requerimientos del proceso, ahora bien, su potencia se transmite al rodete a través de un sistema de poleas y correas. Además, posee juntas de expansión en la succión y descarga.

3.1.7. Sistema de vapor y condensado

El aire al interior de la secadora es calentado a través de intercambiadores de calor de serpentines con vapor, estos están dispuestos en 42 columnas, una a cada lado de cada ventilador de recirculación, cada columna consta de 4 intercambiadores conectados en paralelo y situados uno arriba de otro, es decir, la secadora posee 168 radiadores de vapor.

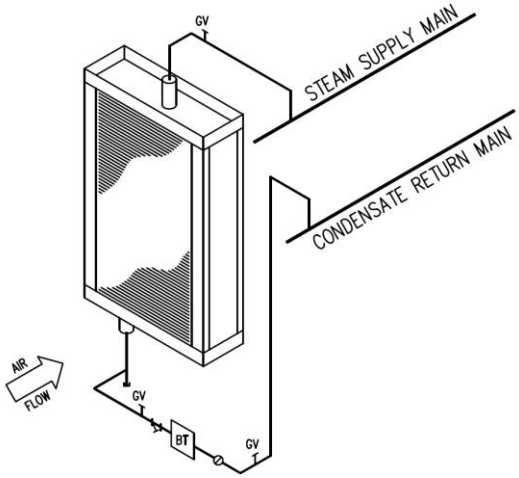


Figura 45. Diagrama de una unidad de intercambiador de calor de serpentines con vapor

Una vez el vapor suministrado a $10[bar]$ entrega su calor latente al aire, este se condensa y es recolectado por un sistema que retorna este condensado a la sala de calderas para ser convertido nuevamente en vapor. El condensado de vapor sigue teniendo mayor poder calorífico que el agua a temperatura ambiente, además, es agua blanda, por lo tanto, posee valor económico.

El sistema de retorno de condensado cuenta con un estanque que recolecta el vapor desde la secadora a $9{,}75[bar]$, debido a que el vapor debe regresar a la sala de calderas a presión solo levemente superior a la atmosférica, el condensado es impulsado por dos bombas centrifugas a un tanque de condensado flash a $1{,}03[bar]$. Esta expansión reduce la energía térmica contenida en el agua, la cual pasa de poseer $757{,}84[kJ/kg]$ a $420{,}93[kJ/kg]$, el calor perdido en el agua transforma parte del condensado nuevamente en vapor ($12[\%]$ de la masa) que es suministrado a otra etapa del proceso.

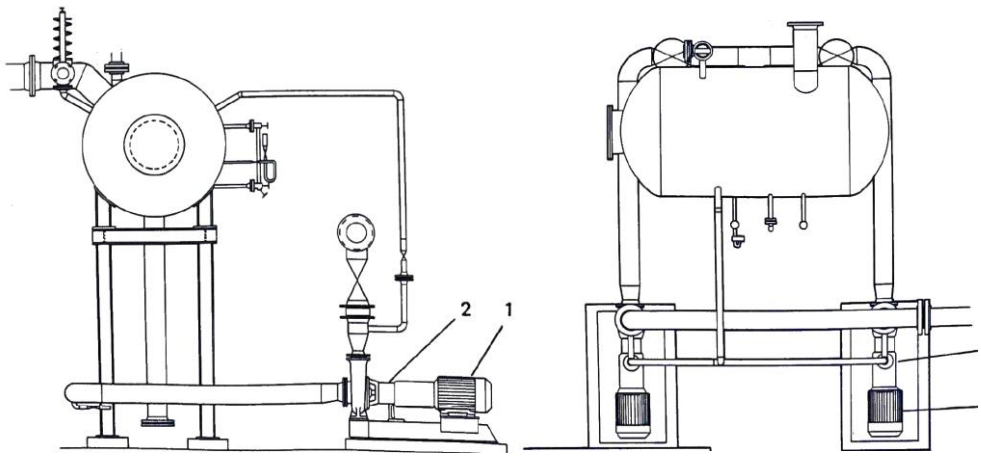


Figura 46. Estanque colector de condensado (Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Secadora FLÄKT [20]).

Luego el vapor es impulsado por diferencial de presión al tanque general de condensado, el cual está a presión atmosférica y recolecta el condensado de todos lo equipos que utilizan vapor en Área Maquina, para finalmente ser impulsado por una bomba centrifuga a la sala de calderas.

3.1.8. Sistema repulpador de hoja de celulosa

A la salida de la secadora se encuentra el pozo de extremo seco, este tiene como función, repulpar la hoja de celulosa en la etapa de puesta en marcha, cuando esta no está en condiciones de pasar a la cortadora, o también, cuando la misma cortadora no se encuentra disponible.

La hoja de celulosa es desviada de su camino normal de operación hacia el pozo, el cual cuenta con suministro de agua, un repulpador accionado por transmisión por correas desde un motor eléctrico y una bomba que impulsa la pulpa de celulosa hacia el Tanque de Recorte, donde se almacena hasta ser suministrada nuevamente al proceso.

La estructura del pozo seco es de hormigón armado recubierto interior mente con cerámicos adosados con mortero al concreto, además cuenta con un transmisor de nivel

y otro de consistencia, los cuales controlan las condiciones de la pulpa y determinan sus márgenes de operación.

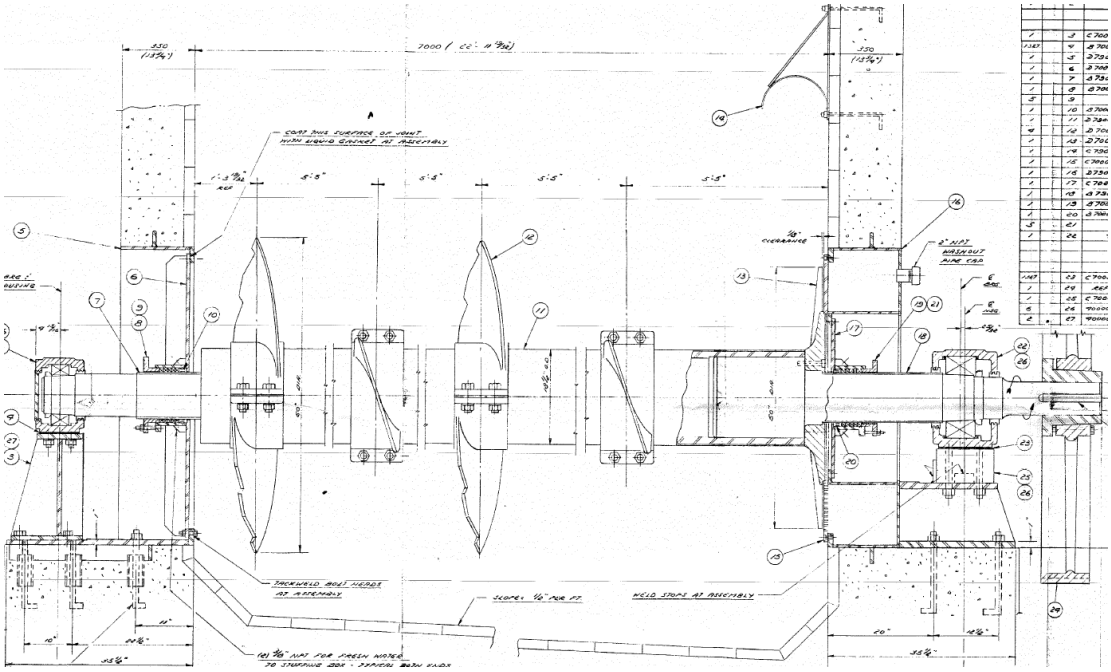


Figura 47, Repulpador de hoja de celulosa (Fuente: Archivo técnico, Celulosa Arauco y Constitución S.A.)

El repulpador está compuesto por 4 hélices de acero, con 4 aspas cada una diseñadas con una geometría idónea para rasgar y repulpar la hoja de celulosa. Estas aspas son intercambiables de manera independiente en caso de finalizar su vida útil.

El eje del repulpador es soportado por dos descansos en ambos extremos lubricados con grasa, en su extremo de accionamiento, tiene acoplado al muñón una polea por donde mediante correas en V es impulsado desde el motor eléctrico.

4. Plan de mantenimiento actual

La estrategia de mantenimiento actual en Área Maquina se basa en un mantenimiento por condición, realizado en rutas de inspección de las distintas especialidades; mecánica, eléctrica, instrumentación, lubricación y operaciones; apoyados por ensayos

no destructivos (END) desarrollados por el equipo predictivo. A partir de estas mediciones se programan tareas de mantenimiento de recuperación en las detenciones programadas.

Las intervenciones programadas se establecen en periodos cíclicos establecidos, que se rigen según los siguientes criterios:

- Paradas de Área (PA): Son realizadas de manera trimestral, es decir cada 3 meses, frecuencia que obedece al requerimiento de Operaciones, sector el cual debe realizar la tarea de *cambio de paño* a las prensas de extremo húmedo (son cuatro paños, un paño por detención). Esta labor se debe ejecutar con la producción detenida, y se prolonga por un lapso de aproximadamente $5[horas]$, tiempo que se utiliza para programar otros trabajos de mantenimiento que requieren esta condición.
- Paradas Generales de Planta (PGP): Esta detención se programa de manera anual, en donde se planifican los trabajos de mayores de mantenimiento en toda la planta.

A partir de información recopilada del software SAP PM, para la etapa de secado de hoja de celulosa, se encontraron 126 planes de inspecciones en ruta y 255 planes de intervenciones preventivas, tales como, cambios cíclicos, inspecciones y calibraciones.

Si bien, esta cantidad de planes existentes pudiesen parecer suficientes para mantener la etapa de secado con una óptima disponibilidad, estos fueron creados sin los estándares establecidos por la Superintendencia de Confiabilidad, presentando las siguientes falencias:

- Ausencia de documentos necesarios, que describan y estandaricen los procedimientos.
- Sin indicación de las ubicaciones técnicas de los equipos a mantener.
- Planes preventivos pausados y utilizados solo de manera correctiva.

- Con frecuencia determinada por los fabricantes, sin adecuarse al contexto o modificaciones posteriores.
- Una excesiva cantidad de planes, los cuales, por la duración de las detenciones no se pueden realizar de manera íntegra, por lo que se deben postergar de manera arbitraria por los mantenedores.
- Planes duplicados, dificultando su seguimiento.
- Equipos críticos sin estrategia de mantenimiento.

Con la inminente necesidad de realizar una mejora a la estrategia de mantenimiento, estandarizar los procedimientos y alinearlos con las políticas de la empresa, se opto por diseñar e implementar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para el "área maquina" en el proceso de producción de celulosa.

5. Gestión estratégica de Superintendencia de Confiabilidad

El modelo de gestión del mantenimiento utilizado por Celulosa Arauco se representa a continuación, donde el trabajo principal desarrollado por la Superintendencia de Confiabilidad consiste en análisis e identificación de casos de oportunidades de mejoras y casos de éxitos.

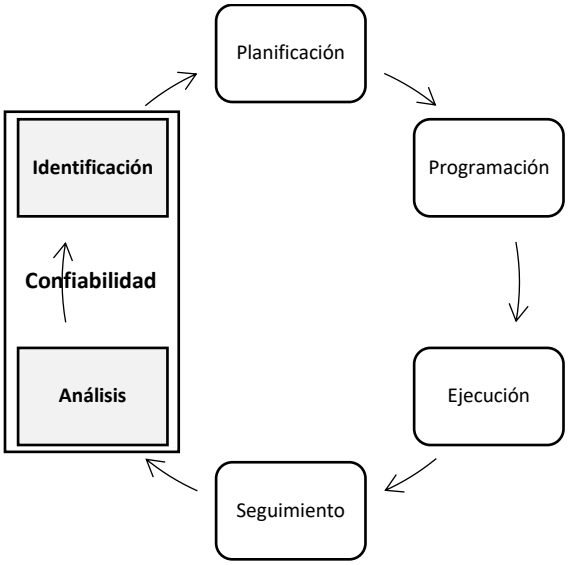


Figura 48. Modelo de gestión de mantención Celulosa Arauco (Fuente: Superintendencia de Confiabilidad ARAUCO [18]).

La gestión de la confiabilidad en Celulosa Arauco se encuentra en un proceso de reestructuración, en donde, dentro de las herramientas con que cuenta esta área de la ingeniería, se ha determinado darles prioridad a tres procesos, análisis causa raíz de malos actores, gestión de riesgo de equipos y estrategia de mantenimiento centrada en confiabilidad (RCM).

Los malos actores serán identificados como, ordenes de trabajos cuya descripción indique intervenciones de mantenimiento correctivo, ya sea por fallas o por condición. En este proceso de identificaran mayores pérdidas y se determinaran planes de acciones para evitarlas.

La gestión de riesgos se hará identificando los diez equipos más riesgosos de cada área, asegurando que se encuentren con monitoreo de variables críticas.

De manera paralela se desarrolló el presente plan de mantenimiento centrado en confiabilidad del Área Máquina, centrándose en los elementos que generan mayores pérdidas, vale decir, el 20[%] de los equipos que generan el 80[%] de las perdidas

según Pareto. El resultado de este RCM se homologará a línea 1 para equipos que posean modos de fallas y contextos similares, realizando estudios RCM específicos a equipos críticos que carezcan de estas cualidades.

5.1. RCM optimizado Área Máquina

El objetivo principal del diseño e implementación del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la etapa de secado es aumentar la disponibilidad del Área Máquina.

La disponibilidad inherente se monitorea en función de indicadores de mantenibilidad (MTTR) y confiabilidad (MTBF), como el Área Máquina es un cuello de botella del proceso, cualquier aumento en su disponibilidad se verá reflejado en un aumento de la producción de la planta, por consiguiente, en los ingresos.

A su vez, el diseño del plan RCM, tiene como objetivo mejorar no solo la disponibilidad inherente, sino también la disponibilidad lograda, optimizando el tiempo utilizado en mantenimiento planificado, y también la disponibilidad operacional, ya que el desarrollo en si del proceso RCM entregará un mayor conocimiento al personal de operaciones, reflejándose en una mejor logística y uso de recursos.

En la siguiente tabla se exponen los valores de dichos indicadores, monitoreados por la superintendencia de producción de ARAUCO desde enero del 2018 hasta octubre del 2019, a partir de los cuales se determinó la disponibilidad del área máquina.

Tabla 13. MTTR y MTBF del Área Máquina. (Fuente: Superintendencia de Confiabilidad ARAUCO).

Mes	MTTR [horas]	MTBF [horas]	Disponibilidad Técnica
Ene-18	5,00	372,00	99%
Feb-18	4,88	223,92	98%
Mar-18	4,82	310,08	98%
Abr-18	0,00	360,00	100%
May-18	2,51	124,08	98%
Jun-18	5,06	240,00	98%
Jul-18	26,71	247,92	90%
Ago-18	5,99	310,08	98%
Sept-18	1,26	240,00	99%
Oct-18	49,26	216,96	81%
Nov-18	76,02	372,00	83%
Dic-18	0,00	372,00	100%
Ene-19	13,17	279,12	95%
Feb-19	71,98	139,92	66%
Mar-19	7,09	310,08	98%
Abr-19	2,42	72,00	97%
May-19	18,87	263,52	93%
Jun-19	15,48	240,00	94%
Jul-19	17,45	310,08	95%
Ago-19	6,54	279,12	98%
Sept-19	1,50	360,00	100%
Oct-19	9,25	372,00	98%

La disponibilidad técnica promedio mensual durante el año 2018 fue de un $95[\%]$ y en lo que va del año 2019, bajo a un $93[\%]$.

Se espera reducir las detenciones no programadas en el área a solo 2 por mes, esto implica aumentar el MTBF a $15\ [días]$, o bien, de $273\ [horas]$ a $360\ [horas]$. Lo que aumentaría la disponibilidad técnica al $97[\%]$, si se mantiene constante el MTTR.

Por otro lado, la disponibilidad operacional presupuestada para la línea 2 es de 233 $[dias/año]$, es decir, de un $64[\%]$, el aumento de disponibilidad técnica significara un aumento de la disponibilidad operacional de un $1[\%]$.

El presente proceso RCM del área maquina se optimizo de la siguiente manera:

Las descripciones funcionales, son generales y no consideran parámetros del proceso o estándares de desempeño, por lo cual se ahorra un tiempo considerable en su desarrollo.

Se estudiarán solo sistemas considerados críticos, ya sea por su alta incidencia en las perdidas de disponibilidad o porque su estado de falla daña al medio ambiente o genera una situación de riesgo a las personas.

6. Análisis del historial de fallas de la etapa de secado

El historial de falla de los componentes mantenibles en la etapa de secado es crucial para poder determinar los equipos que provocan las mayores pérdidas de disponibilidad, por consiguiente, serán los que se analizan en el presente RCM.

Mediante este módulo, SAP PM, es posible generar avisos de avería cuando ocurre cada falla funcional en el sistema, los cuales se pueden descargar de la plataforma de forma estructurada y disponibles para ser analizados según los distintos objetivos de la empresa.

De modo que se generó un reporte de las fallas funcionales ocurridas en la etapa de secado de hoja de celulosa, sin embargo, la calidad de estos avisos de averías depende de la pulcritud con fueron registrados, por lo que para evitar errores de esta índole se debió efectuar una limpieza de estos. Los criterios utilizados para efectuar este filtro fue seleccionar información de los últimos tres años y eliminar avisos duplicados o traslapados.

6.1. Recopilación de avisos desde software ERP

En el software SAP, modulo PM, mediante la transacción IW39 "*Visualizar posiciones de aviso*" se recopilan todos los avisos reportados en el sistema.

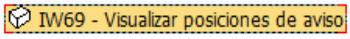


Figura 49. Transacción en ERP – SAP PM [21].

Se seleccionan los avisos a partir del año 2015 para hacer un catastro de la situación y calidad de reportes, sin embargo, después se filtran desde el 2017, fecha desde la cual se asegura la fiabilidad de la información según los lineamientos de la organización.

Figura 50. Selección de filtros al generar reporte de avisos en SAP PM [21].

Además, se seleccionan las ubicaciones técnicas inferiores desde la que individualiza a la Secadora de Pulpa "CA02-400-403".

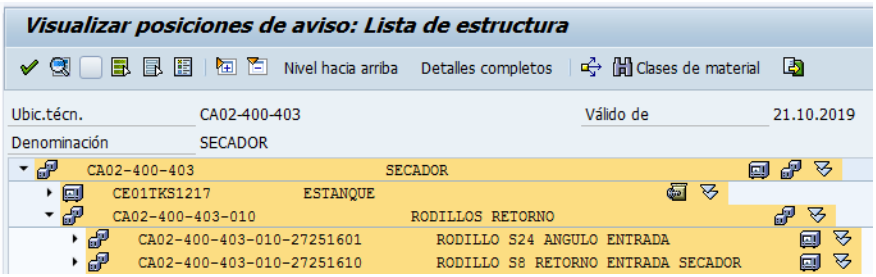


Figura 51. Extracto de visualización de ubicaciones técnicas seleccionadas en SAP PM [21]

Establecidos los parámetros de búsqueda, se genera un reporte detallado donde se indica, tipo de aviso, ubicación técnica, responsable, tiempo de detención, entre otros.

Creado el	Cl.	Descripción	Ubicación técnica	Denominación de la ubicación técnica	Duración parada
22.07.2019	M2	RUTA: 272-31-150 PUNTO CALIENTE	CA02-400-403-012-27225150	INDUCTOR 1 RECIRCULADOR AIRE SECAD...	4,33
23.08.2019	M2	LIMPIAR O BALANCEAR EXTRACTOR	CA02-400-403-012-27225152	EXTRACTOR 1 AIRE HUMEDO SECADORA	0,00
22.07.2019	M2	RUTA: 272-31-152 PUNTO CALIENTE		EXTRACTOR 1 AIRE HUMEDO SECADORA	4,33
26.02.2019	M2	rutas, correas sueltas en equipo	CA02-400-403-012-27225157	INDUCTOR 2 RECIRCULADOR AIRE SECAD...	0,00
30.10.2018	M2	Correas sueltas en inductor secadora		INDUCTOR 2 RECIRCULADOR AIRE SECAD...	4,08
17.06.2019	M2	EMERG:reparar carcasa ext. 272-25159	CA02-400-403-012-27225159	EXTRACTOR 2 AIRE HUMEDO SECADORA	70,00
30.05.2019	M2	cambio de carcasa extractor 272-25159		EXTRACTOR 2 AIRE HUMEDO SECADORA	0,00
03.12.2018	M2	AUMENTO DESBALACEO RESIDUAL		EXTRACTOR 2 AIRE HUMEDO SECADORA	0,00
06.11.2018	M2	daño en cono y carcasa extractor 159		EXTRACTOR 2 AIRE HUMEDO SECADORA	51,00
16.05.2018	M2	REEMPLAZO CARCASA EN EXTRACTOR ...		EXTRACTOR 2 AIRE HUMEDO SECADORA	53,28
23.01.2019	M2	Partidor con dif. de temp 272-31-170	CA02-400-403-012-27225170	VENTILADOR 1 ENFRIA HOJA RETORNO ...	0,00
25.05.2018	M2	Partidor en falla 272-31-170		VENTILADOR 1 ENFRIA HOJA RETORNO ...	3,91
17.08.2018	M2	bajo flujo aire fresco enfriadores L2	CA02-400-403-012-27225171	VENTILADOR 2 ENFRIA HOJA RETORNO ...	2,52
17.08.2018	M2	bajo flujo aire fresco enfriadores L2	CA02-400-403-012-27225172	VENTILADOR 3 ENFRIA HOJA RETORNO ...	0,00
25.05.2018	M2	Partidor en falla 272-31-172		VENTILADOR 3 ENFRIA HOJA RETORNO ...	3,75

Figura 52. Extracto de reporte de avisos obtenido de SAP PM [21].

Ahora bien, este reporte debe ser depurado según los criterios descritos previamente, además cabe señalar que se debe verificar el uso de información confiable.

6.2. Análisis de historial de fallas de la Secadora

La manera en que se analiza la información dispuesta es mediante la aplicación de dos herramientas de priorización de activos, el principio de Pareto y diagrama de Jack-Knife, es relevante el desarrollo de este procedimiento ya que permiten identificar los

elementos que generan mayores pérdidas, en consecuencia, los ítems que generarán mayores beneficios en caso de ser subsanados.

6.2.1. Desarrollo principio de Pareto

A partir del reporte de avisos de averías obtenido del software ERP que utiliza la empresa, SAP PM, se analizaron tres variables de manera independiente determinadas por la clasificación taxonómica que describe la norma ISO 14224 [1].

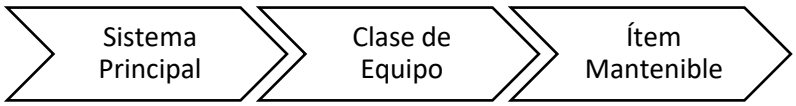


Figura 53. Categoría evaluada según taxonomía descrita en ISO 14224. Nivel 5, 6 y 8 respectivamente [1].

La Secadora se divide en cinco sistemas principales; cajas sopladoras, sistema de vapor y condensado, rodillos de retorno, sistema de levante de cajas sopladoras y secadora.

A partir del reporte de avisos de averías obtenido de SAP PM, se genera una tabla donde además se exponen las variables necesarias para construir un diagrama de Pareto.

Tabla 14. Análisis de cantidad de fallas relativas para cada sistema.

Sistema	Cantidad de Fallas (Frecuencia Absoluta)	Frecuencia Relativa [%]	Frecuencia Relativa Acumulada [%]
Cajas sopladoras	87	63	63
Sistema de vapor y condensado	34	25	88
Rodillos de retorno	7	5	93
Sistema de levante de cajas sopladoras	7	5	98
Secadora	3	2	100
Σ	**138**	**100%**	

Los datos de la *Tabla 9*, se representan en un diagrama de Pareto, a modo de facilitar la comparación cuantitativa entre la cantidad de fallas de los sistemas principales de la secadora.

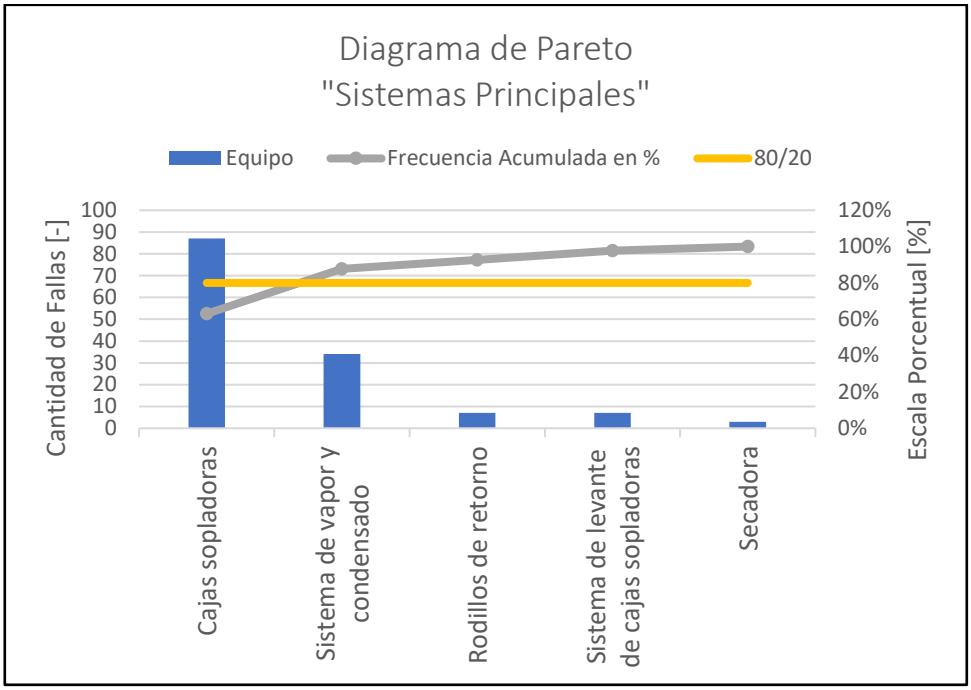


Gráfico 8. Diagrama de Pareto. Cantidad de fallas en los sistemas principales.

Se observa que el 88[%] de las fallas son ocasionadas por el sistema de cajas sopladoras y de vapor y condensado, lo que a su vez corresponden al 40[%] de las posibles causas de fallas. Si bien el principio de Pareto indica que se debe analizar solo 20[%] de estas, también se incluirá en el análisis el sistema de vapor y condensado, ya que representan una importante cantidad de fallas relativas, un 25[%].

Continuando de manera descendente por la clasificación, se estudió como se distribuyen las fallas según la clase de equipo.

Tabla 15. Análisis de cantidad de falla relativa para cada clase de equipo.

Clase de Equipo	Cantidad de Fallas (Frecuencia Absoluta)	Frecuencia Relativa [%]	Frecuencia Relativa Acumulada [%]
Ventiladores de recirculación	40	29%	29%
Pozo extremo seco	13	9%	38%
Estanque de condensado rápido	12	9%	47%
Recuperador de calor	11	8%	55%
Duchas cortadoras	7	5%	60%
Estanque general de condensado	7	5%	65%
Rodillos de retorno	7	5%	70%
Estanque condensado secadora	6	4%	75%
Repulpador	5	4%	78%
Secadora de pulpa	5	4%	82%
Ventiladores de refrigeración	7	5%	87%
Unidad hidráulica	4	3%	90%
Estanque separador de gotas	3	2%	92%
Sistema hidráulico de levante	3	2%	94%
Atemperador	2	1%	96%
Filtro automático de agua	2	1%	97%
Plataforma de elevación	2	1%	99%
Sistema de aspirado	2	1%	100%
Σ	**138**	**100%**	

Estos datos se representan de manera gráfica en la siguiente figura.

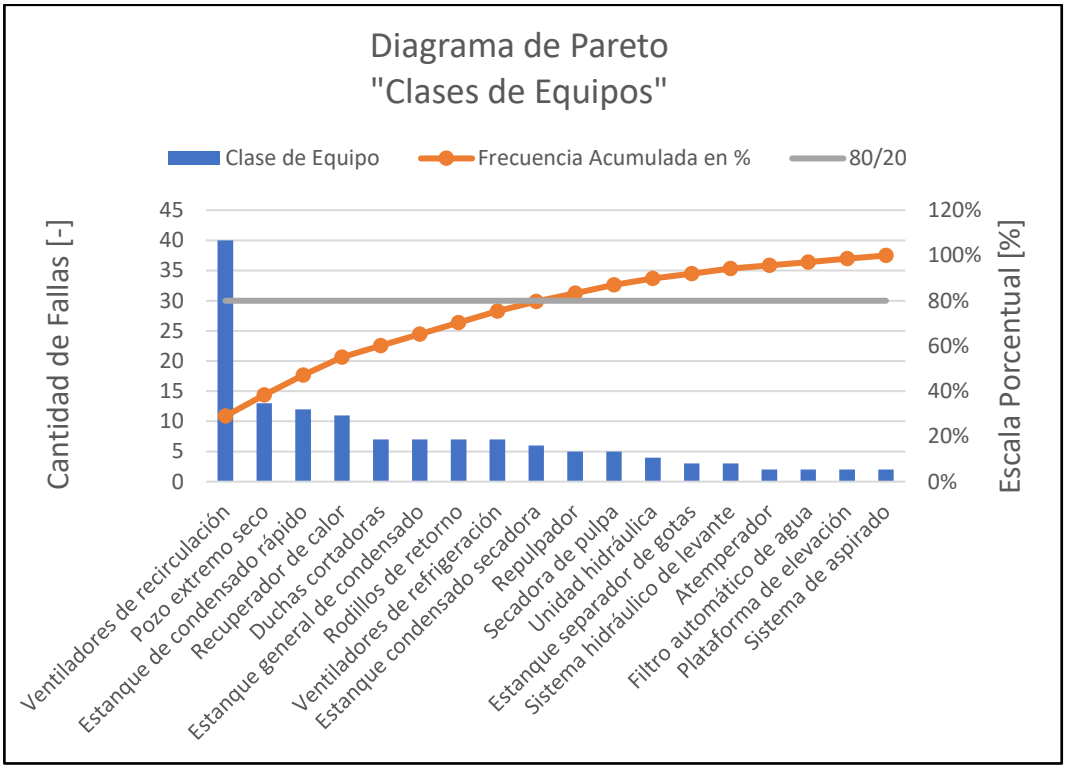


Gráfico 9. Diagrama de Pareto. Cantidad de Fallas de Clases de Equipos.

Al comparar que equipos están por sobre el parámetro de segmentación que dictamina Pareto, se observa cuales presentan un número elevado de fallas.

Los ítems mantenibles también se consideraron un nivel relevante en la taxonomía para determinar la priorización de los activos a analizar, por lo que se subdividieron las cantidades de fallas en las clases que se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 16. Análisis de cantidad de fallas relativas para cada ítem mantenible.

Ítem Mantenible	**Cantidad de Fallas (Frecuencia Absoluta)**	**Frecuencia Relativa [%]**	**Frecuencia Relativa Acumulada [%]**
Motor	33	24	24
Ventilador	16	12	36
Transmisor de T	14	10	46
Válvula	13	9	55
Bomba	13	9	64
Sello	9	7	71
Actuador	7	5	76
Rodillo	6	4	80
Empaquetadura	5	4	84

Caja levante	4	3	87
Extractor	3	2	89
Filtro	3	2	91
Switch	2	1	93
Pozo repulpador	2	1	94
Cilindro	2	1	96
Protección	2	1	97
Conector	1	1	98
Estanque	1	1	99
Serpentines	1	1	99
Línea	1	1	100
Σ	**138**	**100%**	

Gráficamente se exponen de la siguiente manera según el diagrama de Pareto.

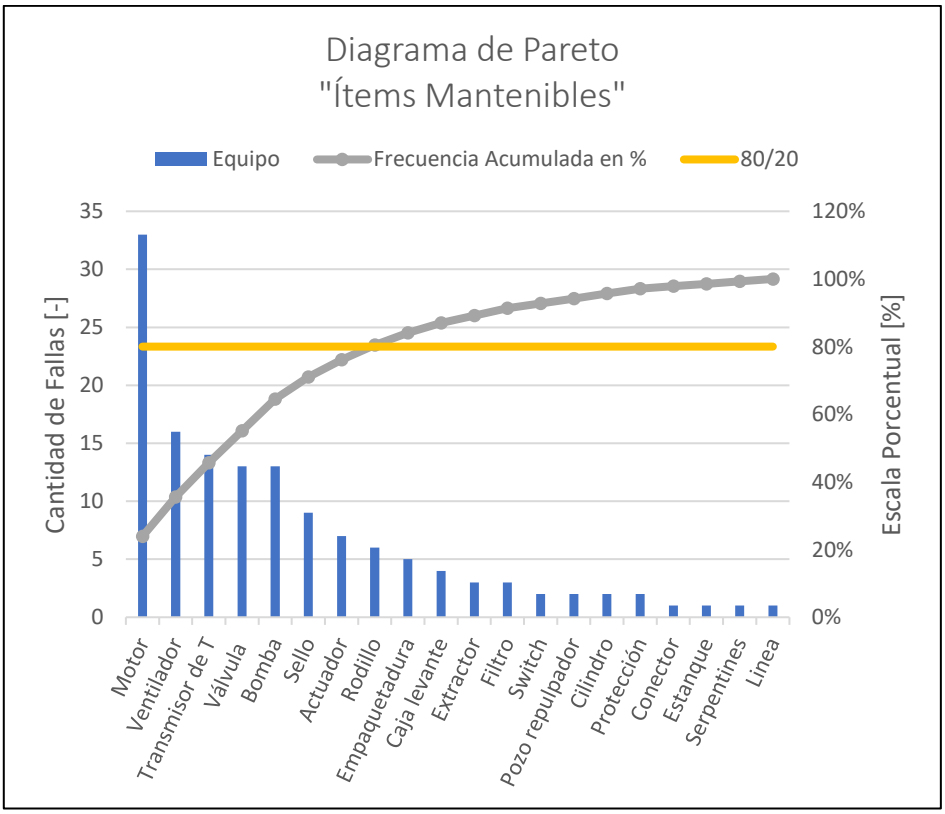


Gráfico 10. Diagrama de Pareto. Cantidad de fallas en ítems mantenibles.

En resumen, con la información obtenida de este análisis jerarquizado de fallas en función de sus fuentes, se obtuvo un primer apronte a los componentes que debiesen ser prioridad para el diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.

Se observa que se generaron tres conjuntos de información, según cada nivel taxonómico, ahora bien, utilizando la lógica matemática y su rama de teoría de conjuntos, se estudiaran los modos de falla de la intersección de dichos conjuntos.

Tabla 17. Componentes de la Secadora para analizar, según Principio de Pareto.

Sistemas Principales	**Clases de Equipos**	**Ítems Mantenibles**
Cajas sopladoras	Ventiladores de recirculación	Motor
Sistema de vapor y condensado	Pozo extremo seco	Ventilador
	Estanque de condensado rápido	Transmisor de T°
	Recuperador de calor	Válvula
	Duchas cortadoras	Bomba
	Estanque general de condensado	Sello
	Rodillos de retorno	Actuador
	Estanque condensado secadora	Rodillo
	Repulpador	Empaquetadura
	Secadora de pulpa	

No obstante, es apresurado concluir sin considerar un parámetro relevante en el estudio de los avisos de averías, el tiempo medio de reparación (MTTR, por sus siglas en inglés, Mean Time To Repair). De esta variable dependen KPIs fundamentales en la gestión del mantenimiento, tales como, disponibilidad y confiabilidad. Para este fin, se utilizó el diagrama de Jack-Knife.

6.2.2. Desarrollo de diagrama Jack-Knife

Al ser ya estudiada la importancia relativa de las fuentes que generan los modos de falla con el principio de Pareto, se optó con evaluar en el diagrama de Jack-Knife, solo el nivel intermedio de jerarquía de componentes, es decir, la clase de equipos.

A partir de los resultados obtenidos en este análisis, de podrá determinar que componentes generan la mayor indisponibilidad, y de esa manera concluir una priorización de activos acordes a los objetivos del diseño de un plan RCM.

Como se describió en Marco Teórico [], se genera una tabla en donde se indica, cantidad de fallas, tiempo de reparación y MTTR.

Tabla 18. MTTR de las clases de equipos en función de la cantidad de fallas y tiempo de reparación.

N°	Clase de Equipo	Cantidad de Fallas	Tiempo de Paradas	MTTR
1	Plataforma de elevación	1	0,00	0,00
2	Plataforma de elevación	1	0,00	0,00
3	Recuperador de calor	11	28,56	2,60
4	Ventiladores de refrigeración	8	12,22	1,53
5	Rodillo de retorno	5	4,68	0,94
6	Ventiladores de recirculación	3	6,81	2,27
7	Ventilador de recirculación	36	60,50	1,68
8	Repulpador	5	3,95	0,79
9	Pozo extremo seco	13	17,28	1,33
10	Estanque general de condensado	7	5,17	0,74
11	Estanque separador de gotas	3	0,00	0,00
12	Rodillos de retorno	2	0,98	0,49
13	Sistema de aspirado	2	0,95	0,48
14	Secadora de pulpa	5	11,90	2,38
15	Filtro automático de agua	2	2,51	1,26
16	Duchas cortadoras	7	5,96	0,85
17	Estanque de condensado rápido	8	14,17	1,77
18	Atemperador	2	0,00	0,00
19	Estanque condensado secadora	6	3,00	0,50
20	Estanque de condensado rápido	4	5,23	1,31
21	Sistema hidráulico de levante	2	0,00	0,00
22	Unidad hidráulica	4	1,48	0,37
23	Sistema hidráulico de levante	1	0,00	0,00

Además, para un análisis más exhaustivo de los valores expuestos se determinan los promedios que actúan como ejes de referencia.

$$\text{Limite MTTR: } 1{,}34\ [horas]$$

$$\text{Limite Cantidad de fallas: } 2{,}26\ [-]$$

Estos valores son representados como rectas paralelas a sus respectivos ejes de coordenadas y ordenadas.

Otro parámetro de comparación que se agrega al análisis, son las rectas de iso-indisponibilidad, son representadas en forma oblicua.

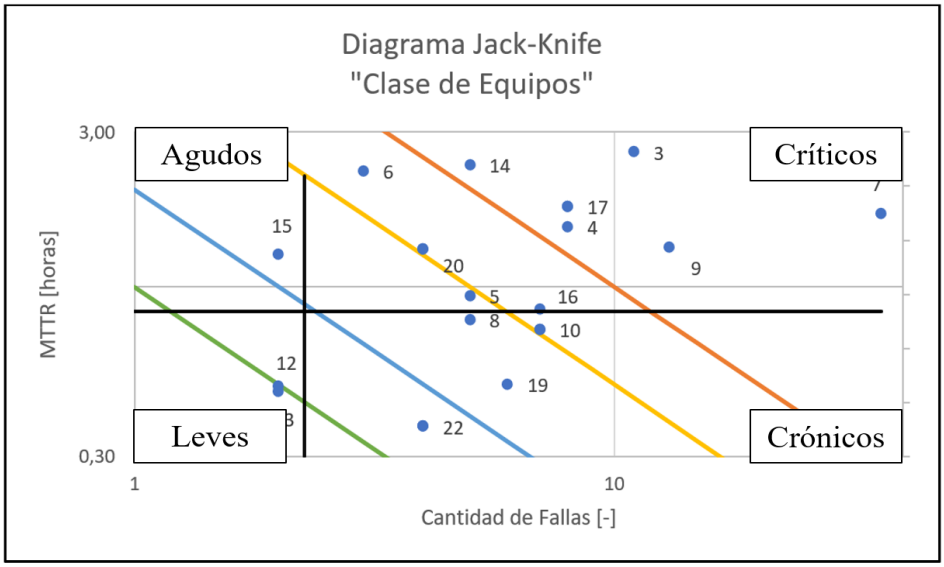


Gráfico 11. Diagrama de Jack-Knife. Cantidad de fallas y MTTR de clases de equipos en la secadora.

A continuación, se ordenan las clases de equipos según la no disponibilidad que generan sus fallas, con ayuda del diagrama generado.

Tabla 19. Clase de equipos en la secadora ordenados de manera descendente en función de la indisponibilidad que generan.

N°	Clase de Equipo
7	Ventilador de recirculación
3	Recuperador de calor
9	Pozo extremo seco
17	Estanque de condensado rápido
4	Ventiladores de refrigeración
14	Secadora de pulpa
6	Ventiladores de recirculación
16	Duchas cortadoras
10	Estanque general de condensado
20	Estanque de condensado rápido
5	Rodillo de retorno
8	Repulpador
19	Estanque condensado secadora
15	Filtro automático de agua
22	Unidad hidráulica
12	Rodillos de retorno
13	Sistema de aspirado

Según relata la teoría del diagrama, los ítems distribuidos en la cuadrante de los críticos y agudos son los que generan mayores pérdidas en la gestión del mantenimiento, por

lo que serán agregados al análisis RCM, ahora bien, también son incluidos los equipos por sobre la recta de iso-indisponibilidad D5, como un parámetro indeseable según los lineamientos de la empresa.

6.3. Conclusión del análisis de historial de fallas

Los activos priorizados por la jerarquización, en función de su historial de avisos de averías, indicó, que componentes del sistema, deben ir incluidos en el análisis RCM de manera que se optimice los recursos destinados para este fin.

Estos componentes serán la columna vertebrar en el diseño del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la etapa de secado de hoja de celulosa.

No obstante, hay otra arista que no ha sido considerada hasta el momento, esta hace referencia a cuanto afecta en la producción, en térmicos económicos, la ocurrencia de alguna falla. Para esto se recopilo información disponible en la Superintendencia de Procesos (SIPRO) y a su vez, debido a la posibilidad de un sesgo personal en la generación de avisos de averías, se consultó por la existencia de malos actores, ya sea recurrentes o graves, según la ocurrencia de un estado de falla.

7. Determinación de equipos estudiados en el plan RCM

Interceptando la información descrita previamente, con base en el historial de averías, experiencia del personal y malos actores en el proceso, informados por la Superintendencia de Producción, se estructuró la siguiente lista de equipos, los cuales conformaran el diseño de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad. Cabe señalar que estos equipos no son únicos, por ejemplo, en la etapa de secado de hoja de celulosa se cuenta con 126 ventiladores de aire de recirculación y además a algunos los subyacen otros ítems mantenibles, tales como; motores, bombas centrifugas, válvulas, transmisores, entre otros.

También se incluyen en el análisis equipos que desarrollar una falla funcional pueden generar una situación de riesgo a las personas o un inminente daño al medio ambiente. Estos son; el sistema de vapor y condensado, escotillas de inspección de la secadora y sistema de levante de cajas sopladoras; las estrategias de mantenimiento de otros sistemas críticos en la seguridad y medio ambiente, tales como, plataformas de elevación y red de extinción e incendio se estudiarán de manera independiente, determinada por la Superintendencia de Confiabilidad.

Tabla 20. Activos de la etapa de secado de hoja que serán analizados en el proceso RCM.

N°	Equipos	N°	Equipos
1	Accionamiento cinta enhebrado	15	Filtro automático de agua caliente
2	Accionamiento rodillos retorno	16	Inductor de aire de recirculación
3	Atemperador	17	Pozo seco repulpador salida secadora
4	Cajas sopladoras	18	Recuperador de calor
5	Calentador de aire de entrada	19	Repulpador salida secadora
6	Cardan accionamiento rodillos retorno	20	Resumidero recuperación calor
7	Cilindro hidráulico de cajas sopladoras	21	Resumidero salida secadora
8	Dispositivo de entrada secadora	22	Rodillo de retorno
9	Enfriador de condensado	23	Secadora de pulpa
10	Estanque general de condensado	24	Sistema vapor y condensado
11	Estanque colector de condensado rápido	25	Unidad hidráulica de cajas sopladoras
12	Estanque colector de condensado	26	Ventilador enfriador de hoja
13	Extractor de aire húmedo	27	Ventilador recirculador aire secado
14	Extractor de desechos		

8. Análisis de los modos de falla, efecto y criticidad de los componentes seleccionados

Determinados los equipos a analizar, se procedió a confeccionar la planilla FMECA, la cual representa en sus columnas, la base para un proceso RCM.

8.1. Confección de Hoja de Análisis

La primera etapa consiste en responder las dos primeras preguntas de la metodología RCM, lo cual completa las primeras filas del FMECA según los criterios y recomendaciones de buenas prácticas para el desarrollo de un RCM que dicta la norma SAE JA1012[4]. Se describen las funciones de cada uno de los equipos y la manera en

que dejan de realizarla. Ahora bien, se expondrá como ejemplo el desarrollo del proceso para los rodillos de retorno.

Tabla 21. Hoja de Análisis que responde las dos primeras preguntas de la metodología RCM.

Equipo	Función del Equipo	Falla Funcional
Rodillo de Retorno de Salida	Transmitir tracción a la hoja de celulosa durante la puesta en marcha, a una velocidad constante y mayor que la velocidad en la Tercera Prensa en 1,5±0,5[m/min]. Sin dañar la hoja de celulosa.	Transmite tracción deficiente a la hoja de celulosa a una velocidad menor que 1,5±0,5[m/min] más rápido que la Tercera Prensa.
		Daña la hoja de celulosa.
		No transmite tracción a la hoja de celulosa.
		No transmite tracción de manera constante a la hoja de celulosa.
	Impulsar y guiar la punta de hoja de celulosa por la secadora en etapa de enhebrado a una velocidad constante e inferior a la de la hoja de celulosa en un 0,6±0,1[%].	Impulsa la hoja de celulosa con variaciones de velocidad e inferior que 0,6±0,1[%] menor que la velocidad de los rodillos de retorno.
		Incapaz de impulsar la punta de hoja a través de la secadora.
	Guiar la hoja de celulosa a lo largo de la secadora a velocidad constante y cambiar su dirección en 180[°] al llegar al extremo.	No es capaz de guiar la hoja de celulosa a velocidad constante a lo largo de la secadora.
		Incapaz de guiar la hoja de celulosa a lo largo de la secadora.
	Desconectar el accionamiento de los rodillos finalizada la etapa de enhebrado, es decir, cuando la tracción que traslada la hoja es suministrada completamente por el Pull Roll, a la salida de la secadora.	No transmite tracción de manera constante a la hoja de celulosa.
		Desconecta solo parcialmente el accionamiento de los rodillos cuando finaliza la etapa de enhebrado.
		No desconecta el accionamiento de rodillos cuando finaliza la etapa de enhebrado.

Luego se responde la tercera pregunta, mediante esta consulta se pudo determinar las causas de las fallas funcionales, es decir, sus modos de falla. Se utilizaron herramientas, tales como, diagrama de Ishikawa, brainstorming y norma ISO 14224 [1].

Además, determinado el modo de falla principal, se consulta de manera consecutiva el porqué de este modo de falla, hasta llegar una causa raíz que pueda ser evitada con alguna estrategia de mantenimiento [Ver anexo A].

Tabla 22. Ejemplo de uso de la estrategia del ¿Por qué? ¿Por qué? Para determinar causa raíz de los modos de falla.

Falla Funcional	Modo de Falla			
No transmite tracción a la hoja de celulosa	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
	Corte de cadena de accionamiento de rodillo	Por deterioro de sus componentes	Por tensión excesiva	Por ausencia de procedimiento adecuado.

Además, si el ejemplo anterior se expone según el diagrama de Izhikawa o "espina de pescado", la falla funcional se dispone en la "cabeza" y este modo de falla se encontraría en la "espina" correspondiente al Método.

Este procedimiento se replicó para las 27 clases de equipos, los cuales a su vez se subdividen en un total de 36 ubicaciones técnicas de equipos distintos en SAP PM, se mencionan como "distintos", porque, por ejemplo, los Rodillos de Retorno de Salida, en total son 12, sin embargo cada uno trabaja en el mismo contexto y posee las mismas especificaciones técnicas, es decir, sus modos de fallas se replican a los demás, los cuales además poseen una ubicación técnica distinta.

Tabla 23. Equipos con ubicación técnica única y la cantidad de estos equipos que se encuentran en la etapa de secado, con la contabilización de la cantidad de sus modos de falla.

Equipo (con UT única)	**Unidades**	**Modos de falla**	**Modos de falla totales**
Accionamiento Rodillos de Retorno	1	53	53
Accionamiento Cinta de Enhebrado	1	93	93
Dispositivo de entrada a la Secadora	2	36	72
Rodillo de Retorno de Salida	12	59	708
Rodillo de Retorno de Entrada	12	48	576
Cardan de Rodillos de Retorno	2	4	8
Cajas Sopladoras	1	3	3
Bomba de recuperador de calor	2	95	190
Bomba de Pozo Seco a Estanque de Recorte	1	111	111
Bomba de resumidero de secadora	1	40	40
Estanque recuperador de calor	2	131	262
Pozo repulpador extremo seco	1	62	62
Resumidero salida secadora	1	11	11
Inductor de aire a la secadora	2	88	176
Extractor de aire de la secadora	2	77	154
Ventilador de refrigeración Tipo 1	3	60	180
Ventilador de recirculación de aire	126	52	6552
Ventilador de refrigeración Tipo 2	2	48	96
Repulpador pozo salida secadora	1	77	77
Accionamiento de extractor de desechos	2	7	14

Secadora pulpa	1	90	90
Extractor de desechos	2	13	26
Calentador de aire de entrada	2	13	26
Recuperador de calor	2	3	6
Filtro automático de agua caliente	1	6	6
Sistema vapor y condensado	1	1	1
Bomba de condensado a Estanque Flash	2	62	124
Bomba de condensado a Planta Térmica	1	77	77
Bomba de condensado a atemperador	1	11	11
Estanque General de Condensado	1	82	82
Estanque Colector de Condensado de Secadora	1	72	72
Estanque de Condensado Flash	1	80	80
Enfriador condensado	1	7	7
Bomba hidráulica de sistema de levante de cajas	1	42	42
Sistema hidráulico de levante de cajas	1	6	6
Cilindro hidráulico de levante de cajas	20	18	360
	Σ	1736	10452

Cabe mencionar, que la base para que un plan RCM se desarrolle de manera saludable es no creer que el objetivo es llenar una planilla de texto, es sumamente relevante considerar su entorno de operación de cada ítem mantenible, sus parámetros de operación o si se puede acceder a él de manera segura al realizar mantenimiento, por lo que debe evaluarse de manera independiente cada componente y sus modos de falla. Si bien puede que tengan características en común, como sus límites o hasta componentes, es primordial evaluar su contexto.

8.1.1. Consecuencias de estados de falla

Las consecuencias de los modos de falla, como enuncian los lineamientos de la norma SAE-JA1012 [4] se catalogaron en primera instancia en evidentes u ocultas, para posteriormente determinar si dañan el medio ambiente, causan perdidas de producción o gastos de mantenimiento.

Al entrar con un modo de falla al diagrama de decisión RCM, se expone la siguiente pregunta que es imperativo responder:

P	*¿La pérdida de la función causada por este modo de falla solo se vuelve evidente para el equipo de operadores en circunstancias normales?*	
R	*Si*, consecuencia evidente.	*No*, consecuencia oculta.

Tabla 24. Resumen del análisis que determina si un estado de falla es Evidente u Oculto.

Consecuencias de modos de falla		
Evidentes	956	55 [%]
Ocultas	780	45 [%]
Σ	1736	100 [%]

Se observa que, de un total de 1736 modos de falla únicos, un $55[\%]$ son evidentes a los operadores en el proceso y un $45[\%]$ deben ser determinados por un método de detección si se estima conveniente reducir el riesgo cuando esta ocurre.

Este primer criterio diferenciador de los modos de falla es la entrada a la aplicación de la lógica de decisión de un RCM, el cual determinara finalmente, que tipo de mantenimiento es el más adecuado para cada uno.

8.2. Análisis de riesgo y aplicación de lógica de decisión RCM

La aplicación del diagrama de decisión permite determinar el tipo de mantenimiento más adecuado a cada modo de falla según su consecuencia, cada tipo de mantenimiento seleccionado debe reducir el riesgo del modo de falla un nivel tolerable, definido por la organización y además debe ser el más optimo en términos técnicos y económicos.

Los riesgos tolerables se definen, en primera instancia, según su Número Prioritario de Riesgo (RPN, por sus siglas en inglés, Risk Priority Number), el cual habita en tres dimensiones, las cuales según la Norma SAE JA1012 [] poseen un rango de 1 a 10, por lo que el rango del RPN ve del 1 al 1000. Estos niveles son definidos según los criterios de Celulosa Arauco, a partir las tablas de severidad de la consecuencia si sucede el modo de falla (S), probabilidad de que ocurra el modo de falla (O) y capacidad de detección del modo de falla.

$$1 \leq S \cdot O \cdot P \leq 1000$$

(Fórmula 12)

Según esto, el diagrama de decisión discrimina la admisibilidad del riesgo en tres preguntas:

P1	*¿Existe un riesgo intolerable de que los efectos de este modo de falla puedan dañar o matar a alguien?*	
R1	*Si*, consecuencia a la seguridad.	*No*, otra consecuencia. Pasar a P2
P2	*¿Existe un riesgo intolerable de que los efectos de este modo de falla puedan violar un estándar o una regulación ambiental conocida?*	
R2	*Si*, consecuencia al medio ambiente.	*No*, otra consecuencia. Pasar a P3

Si los modos de fallas pertenecen a esta categoría, es decir, pueden causar un efecto adverso capaz de herir o matar a alguien, o infringir alguna ley o normativa vigente con el medio ambiente, deben ser controlados siempre con acciones de mantenimiento proactivas, las cuales, a su vez, mantengan el RPN en un valor máximo admisible de 60. De lo contrario se debe rediseñar hasta lograr un nivel admisible de riesgo.

P3	*¿El modo de falla tiene un efecto directo adverso en la capacidad operacional (ventas, calidad o productividad)?*	
R3	*Si*, consecuencia operacional.	*No*, consecuencia no operacional.

Las consecuencias operacionales se tratan del siguiente modo, se permite un mantenimiento correctivo hasta un RPN de 40, un mantenimiento preventivo hasta un RPN de 180 y para un RPN mayor se indica un mantenimiento basado en condición.

Por último, para consecuencias no operacionales, se admite un mantenimiento correctivo para un RPN menor a 10, para valores mayores de indica un mantenimiento preventivo o en su defecto evaluar un mantenimiento por condición.

En resumen, las consecuencias de los modos de falla se distribuyen como expone la siguiente tabla.

Tabla 25. Resumen de la distribución en las consecuencias de los modos de falla.

Consecuencia de modos de falla	Al medio ambiente o a la seguridad	A la capacidad operativa	A gastos de reparación	Σ	
Evidentes	151	726	79	956	55[%]
Ocultas	22	252	506	780	45[%]
Σ	173	978	585	**1736**	**100**[%]
	10[%]	56[%]	34[%]	**100**[%]	

A continuación, se definen cuan tolerables son los distintos riesgos, según su consecuencia y valor RPN.

Tabla 26. Tipo de mantenimiento a priori para cada modo de falla, según el tipo de consecuencias y su RPN.

	Consecuencias de los modos de falla		
	Medio ambiente o seguridad	**Operacionales**	**No operacionales**
Mantenimiento Correctivo	Nunca	$RPN \leq 40$	$RPN \leq 10$
Mantenimiento Preventivo	$RPN \leq 60$	$RPN \leq 180$	$RPN > 10$
Mantenimiento por Condición	$RPN > 60$	$RPN > 180$	Evaluar
Cambio de Diseño	Evaluar	Evaluar	Evaluar

Cabe mencionar que esta es un criterio a priori y que se utiliza de columna vertebral del plan de mantenimiento, no obstante, se determinó cada tipo de mantenimiento según las siguientes consideraciones:

- **Consecuencias a la seguridad y medio ambiente:** La estrategia de mantenimiento adoptada para el modo de falla debe reducir a un nivel admisible el riesgo de la falla.
- **Consecuencias a la capacidad operativa:** Para cierto horizonte de análisis, la estrategia de mantenimiento adoptada para el modo de falla debe costar menos que los gastos originados por la falla.
- **Consecuencias no operacionales:** Para cierto horizonte de análisis, la estrategia de mantenimiento adoptada para el modo de falla debe costar menos que la propia reparación de la falla.

Cada evaluación y criterio fue realizada en conjunto con mantenedores expertos de las respectivas áreas, junto a ellos y con ayuda de manuales se establecieron frecuencias y responsables.

Finalmente, se realizaron talleres progresivos con los líderes responsables de cada área, mantenimiento mecánico, instrumentistas, eléctricos y procesos, guiados por un facilitador de la Superintendencia de confiabilidad, en esta instancia se revisaron de manera individual los modos de fallas y sus estrategias de mantenimiento asignadas, evaluando factibilidad técnica y económica.

Con un método de iteración en la estrategia definida y el riesgo aceptable de las consecuencias, se llegó al tipo de mantenimiento más idóneo para cada modo de falla.

Como entregable, se dispone de la Hoja de Resultados optimizada acorde a los estándares de Celulosa Arauco, donde se expone, tarea propuesta, frecuencia y responsable (ver anexo B).

9. Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la etapa de secado de hoja de celulosa

El plan de mantenimiento debe ser estratégico e integral para cumplir con los objetivos comprometidos por la compañía. Estos objetivos deben incluir indicadores de gestión que permitan medir el avance. Según esto, se describe la estrategia de mantenimiento actual, sus consideraciones, lineamiento y alcances, para luego en el marco de los límites y políticas de la empresa ARAUCO, proponer un plan de mantenimiento centrado en aumentar la disponibilidad de los activos.

El diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la etapa de secado de hoja de celulosa fue en marcado en un proceso según los limites designados por ARAUCO, tales como, recursos disponibles para el proceso RCM en si, como también, los recursos destinados para las labores de mantenimiento.

Tras el análisis cualitativo y cuantitativo de las fallas funcionales de los equipos, según las distintas herramientas de confiabilidad, principalmente el FMECA, se genero una estrategia de mantenimiento distribuida en tareas correctivas, preventivas, predictivas (o por condición) y mejorativas (cambio de diseño). Como se mencionó previamente se estudiaron 1736 modos de fallas únicos, los cuales, debido a la duplicidad de equipos que operan bajo el mismo contexto y especificaciones técnicas se tradujo en un FMECA de 10452 filas.

Tabla 27. Distribución de tareas propuestas según tipos de mantenimiento.

Tipo de mantenimiento	**Modos de falla únicos**		**Modos de falla totales**	
Cambio de Diseño	76	4%	733	7%
Mantención Correctiva	443	26%	1224	12%
Mantención por Condición	613	35%	3858	37%
Mantención Preventiva	604	35%	4637	44%
Total	**1736**	**100%**	**10452**	**100%**

Un indicador relevante en el análisis de gestión del mantenimiento es la relación entre mantenimiento correctivo (MC) y mantenimiento proactivo (MP), es común en la industria mencionar que una estrategia de mantenimiento adecuada mantiene una relación de un 20[%] a 30[%] de actividades correctivas y 80[%] a 70[%] de mantenimiento proactivo.

En el diseño del presente plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la etapa de secado se observa una relación de 13[%] de MC 87[%] de MP, lo que deja un margen de aproximadamente un 10[%] para el desarrollo de actividades de mantenimiento correctivo no planificado.

10. Propuesta de implementación de plan de mantenimiento

Para implementar un plan de mantenimiento primero se debe conocer qué se va a mantener y con qué estrategia; lo cual ya se ha definido con la herramienta RCM; no

obstante, luego se debe definir cómo se va a hacer y cuándo o cuál es el mejor momento para hacerlo.

Según el contexto y organización de la empresa, la Superintendencia de Confiabilidad en conjunto con la Superintendencia de Planificación y con cooperación de la Superintendencia de Mantenimiento, deben evaluar factibilidad, programar y preparar los diferentes tipos de tareas; las que no se organizan todas de la misma manera. Un mismo equipo puede estar sujeto a un gran número de tareas distintas, tales como, sustituciones cíclicas, análisis predictivo, inspecciones dinámicas, lubricación e incluso correctivas. Además, un mismo sector productivo, en este caso el Área Máquina, puede incluir varios activos, por lo que la dificultad para organizar todas estas actividades e implementar un Plan de Mantenimiento Integral puede ser elevada.

Para solucionar este problema, primero se dividen las tareas por área responsable, en tipo de mantenimiento y luego en rango de frecuencias (altas o bajas); donde aquellas frecuencias mayores a 3 meses son consideradas bajas.

Tabla 28. Segmentación de tareas de mantenimiento según responsable, tipo de mantenimiento y frecuencia.

Responsable	**Cambio de Diseño**	**Mantención Correctiva**	**Mantención por Condición**		**Mantención Preventiva**		**Σ**
			F. Alta	F. Baja	F. Alta	F. Baja	
Obras civiles		5				1	6
Maestranza		71				6	77
Mecánico	56	57	128	60	19	46	366
Lubricador	4		23	3	62	12	104
Electrónica de Potencia						42	42
Eléctrico	28	265	97		101	127	618
Instrumentación		45	139	25	8	141	358
Predictivo			143	6			149
Operaciones	2			5	6	3	16
Σ	90	443	530	99	196	378	1736

Ahora bien, las tareas de alta frecuencia se denominan Rutas, las cuales serán planificadas, programadas y optimizadas por el área responsable en función de sus recursos y capacidades. Estas Rutas tampoco serán programadas en el sistema informático SAP PM, ya que generarían una cantidad desmedida de papeles y ordenes de trabajo, sin embargo, el responsable debe velar y registrar la correcta ejecución de

estas, además, el Ingeniero de Confiabilidad será un ente fiscalizador de dichas ejecuciones.

Por otro lado, las actividades de baja frecuencia se planifican en el sistema informático SAP PM con la denominación Plan de Mantenimiento Preventivo, lo cual incluirá en la práctica, todos los planes de mantenimiento proactivo de baja frecuencia.

Estas tareas de baja frecuencia se distribuyen en periodos de 26 semanas, 1, 2, 3, 5 o 10 años. Además, se clasifican en tareas que requieren detener el equipo (fuera de servicio) o pueden ser realizadas con el equipo en marcha (en servicio), por otro lado, también es necesario determinar si la tarea es realizada por personal de planta o especialistas externos.

Este proceso tiene como nombre Paquetización, en donde las tareas se agrupan según responsables, frecuencias, en servicio o fuera de servicio y personal interno o externo. Una vez que un grupo de tareas se han "paquetizado" se les asigna un "Nombre de Orden de Trabajo" la cual incluye frecuencia y una breve descripción de la tarea a realizar, por ejemplo:

156S CAMBIO DE EMBRAGUE SEC

Lo cual hace referencia a el cambio de embrague de los rodillos de retorno de la secadora cada 156 semanas o 3 años, bajo este "Nombre de OT" se creará el plan de mantenimiento en SAP PM, se adjuntarán, repuestos e insumos necesarios, documentos de control de calidad y programará su ejecución. Se expone como ejemplo, el "paquetizado" del plan de mantenimiento para Rodillos de Retorno de Entrada (ver anexo C).

En resumen, se obtuvo la siguiente distribución de rutas y planes de mantenimiento para la etapa de secado.

Tabla 29. Distribución de Rutas y Planes de mantenimiento en las distintas áreas responsables.

Responsable	**Ruta (alta frecuencia)**	**Plan proactivo (baja frecuencia)**
Obras civiles		1
Maestranza		3
Mecánico	5	25
Lubricador	6	5
Electrónica de Potencia	12	1
Eléctrico	7	1
Instrumentación	12	9
Predictivo	4	6
Operaciones		2
Σ	46	53

Cabe mencionar, que, si bien los planes preventivos son exclusivos de la etapa de secado, algunas las rutas involucran otras etapas del proceso, debido a la optimización de estas realizadas por cada área responsable.

10.1. Generación de documentos

Definidos los planes de mantenimiento para cada equipo, singularizados por su "Nombre de OT" se generaron los documentos de control de calidad de los procedimientos, catalogados como un requerimiento mínimo, para un desarrollo de las tareas de mantenimiento que cumpla los estándares requeridos y mantenga bajo control los riesgos de las consecuencias de los modos de falla determinados en el FMECA. Como se mencionó, las tareas se dividieron según su frecuencia de ejecución, donde las de una frecuencia mayor a 12 semanas se catalogaron como Rutas y las de menor frecuencias como Planes Proactivos de mantenimiento.

10.1.1. Rutas de mantenimiento de alta frecuencia

Para las Rutas se determinó la necesidad de generar una Pauta de Ruta de Mantenimiento (PRM) la cual enumera en una lista los equipos que se van a inspeccionar o mantener en un orden lógico según la distribución de estos equipos en la planta, además, debe contar con columnas para registrar cada característica que se inspeccione o mantenga en el equipo.

Rutas de mantenimiento consideradas en plan RCM etapa de secado:

- Área Eléctrica e Instrumentistas.

  Rutas de inspección de motores eléctricos.

  Rutas de inspección de transmisores de flujo, presión, nivel y humedad.

  Rutas de inspección de válvulas de control.

  Ruta de inspección de transmisores de consistencia.

- Área de Lubricación y Sistemas Hidráulicos.

  Rutas de lubricación de motores eléctricos

  Rutas de lubricación de bombas centrifugas

  Rutas de lubricación de extractores y ventiladores.

  Ruta de lubricación de accionamientos de la secadora.

  Ruta de inspección semanal de equipos críticos de área máquina.

  Ruta de inspección de unidad hidráulica de levante de cajas sopladoras.

- Área Mecánica.

  Ruta de inspección de equipos críticos de la etapa de secado.

  Ruta de inspección de ventiladores de recirculación.

  Ruta de inspección de rodillos de retorno.

  Ruta de inspección de sistema de levante de cajas sopladoras.

- Área de Electrónica de Potencia.

  Ruta de medición de corriente en panel de centro de control de motores.

  Ruta de medición de temperatura en panel de centro de control de motores.

- Área Predictiva.

  Ruta predictiva de polines

  Ruta predictiva de motores eléctricos

  Ruta predictiva de ventiladores

  Ruta predictiva de equipos críticos de área máquina.

En la siguiente ilustración se expone PRM de equipos críticos de la etapa de secado, según formato utilizado en ARAUCO.

Tabla 30. Pauta de Ruta de Mantenimiento según formato ARAUCO, para una ruta de inspección mecánica semanal a los equipos críticos de la etapa de secado.

arauco	RUTA CRÍTICA SECADORA																	
N° RUTA:	INSTRUMENTOS NECESARIOS																	
NOMBRE DE RUTA: 1S RUTA CRÍTICA SECADORA	- VIBROPEN - LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA - PIRÓMETRO																	
FRECUENCIA: UNA SEMANA	FECHA:																	
TIEMPO ESTIMADO: 150 MINUTOS																		
N°	UBICACIÓN TÉCNICA	TAG	K-P-O	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	Ubicación geográfica	Vibración lado transm.	Vibración lado libre	Temperatura lado transm.	Temperatura lado libre	Fugas / Filtraciones	Corrosión / soltura / base / soportes	Ruidos anormales	Sistema transmisión	Sello mec. / prensa estopa	Circuito Refrigeración	Lubricación / fugas / niveles / Visor	Limpieza	OBSERVACIONES
1	CA02-400-403-012-27225152	272-25-152		EXTRACTOR 1 AIRE HUMEDO SECADORA														
2	CA02-400-403-012-27225170	272-25-170		VENTILADOR 1 ENFRIA HOJA RETORNO SECADO														
3	CA02-400-403-012-27225171	272-25-171		VENTILADOR 2 ENFRIA HOJA RETORNO SECADO														
4	CA02-400-403-012-27225172	272-25-172		VENTILADOR 3 ENFRIA HOJA RETORNO SECADO														
5	CA02-400-403-012-27225159	272-25-159		EXTRACTOR 2 AIRE HUMEDO SECADORA														
6	CA02-400-403-012-27225157	272-25-157		INDUCTOR 2 RECIRCULADOR AIRE SECADO														
7	CA02-400-403-012-27225150	272-25-150		INDUCTOR 1 RECIRCULADOR AIRE SECADO														
8	CA02-400-403-012-27225427	272-25-427		VENTILADOR AIRE REFRIGERACION 4														
9	CA02-400-403-012-27221155	272-21-155		BBA RESUMIDERO RECUPERACION CALOR 1														
10	CA02-400-403-012-27225428	272-25-428		VENTILADOR AIRE REFRIGERACION 5														
11	CA02-400-403-012-27221162	272-21-162		BBA RESUMIDERO RECUPERACION CALOR 2														
12	CA02-400-403-013-27221307	272-21-307		BBA TK GENERAL CONDENSADO PLANTA TERMICA														
13	CA02-400-403-013-27221305	272-21-305		BBA 1 TK COLECTOR COND TK COND RAPIDO														
14	CA02-400-403-013-27221306	272-21-306		BBA 2 TK COLECTOR COND TK COND RAPIDO														
15	CA02-400-403-012-27221299	272-21-299		BBA REPULPEADOR SALIDA TK RECORTE														
16	CA02-400-403-012-27228298	272-28-298		REPULPADOR POZO SALIDA SECADORA														
17	CA02-400-403-013-27223302	272-23-302		TK COLECTOR CONDENSADO 975 KPA														
18	CA02-400-403-013-27223303	272-23-303		TK CONDENSADO RAPIDO														
19	CA02-400-403-013-27222304	272-22-304		TK GENERAL CONDENSADO														
20	CA02-400-403-013-27258308	272-58-308		ENFRIADOR CONDENSADO														
21	CA02-400-403-012-27259060	272-59-060		FILTRO AUTOM SIST AGUA CALIENTE DIGESTOR														
22	CA02-400-403-012-27251173	272-51-173		EXTRACTOR DESECHO LADO HUMEDO SECADORA														
23	CA02-400-403-012-27251177	272-51-177		EXTRACTOR DESECHOS LADO SECO SECADORA														

Los documentos PRM deben cumplir las siguientes limitantes:

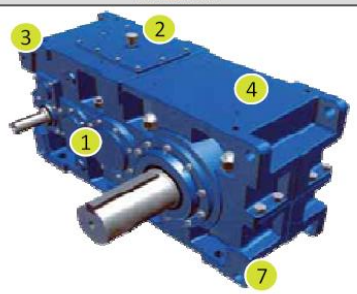
- Un máximo de 25 equipos.
- Ordenada en un orden lógico de inspección y un recorrido caminable.
- Tiempo máximo de duración, 150 [minutos].

Estos criterios velan por un trabajo de mantenimiento estandarizado, practico de programar y realizar, además, en el ámbito de la seguridad, disminuye la probabilidad accidentes en ruta por la planta debido a agotamiento o deshidratación del personal de mantenimiento debido a la elevada humedad y temperatura del Área Máquina.

Además, el técnico mantenedor que realizara la ruta de mantenimiento debe tener conocimiento previo de las buenas prácticas de mantenimiento, para esto de implementan Hojas de Trabajo Estándar (HTE), las cuales son procedimientos detallados de una correcta tarea de inspección a las distintas clases de equipos.

Tabla 31. Hoja de Trabajo Estándar según formato ARAUCO, para la inspección mecánica de reductores en ruta.

arauco	Hoja de Trabajo Estándar		Proceso	Ruta inspección Reductores
Ruta Inspección Mecánica	Última actualización	Actualizado por	Aplicación	Todas las rutas de inspección mecánica que involucren reductores de todas las áreas.

#	Descripción paso a seguir	Ilustración
1	Revisar que tapas de descansos, retenes y filtros no se encuentren con fuga de aceite.	
2	Revisar que respiradero no se encuentre obstruido y en buenas condiciones.	
3	Limpiar filtros en caso de ser necesario (si aplica).	
4	Revisar que carcaza esté limpia, no posea grietas y pintura esté en buen estado.	
5	Revisar nivel de aceite de caja reductora. Limpiar cuidadosamente reductor antes de abrir tapón de aceite. Si no lo hace, puede generar contaminación de aceite.	
6	En caso de suciedad excesiva, limpiar reductor rigurosamente.	
7	Revisar el estado de pernos de soporte. Verificar apriete y existencia de tuerca (si aplica).	
8	Prestar atención a sonidos anormales en motorreductor.	
9	Medir temperatura de carcasa con pistola o cámara termográfica (máx. 90°C) - General - Sector rodamiento lado equipo - Sector rodamiento lado motor	
10	Medir vibraciones en equipos con rotación usando Vibropen en lado motor y lado equipo.	
	Cuidado de no acercarse a las partes rotatorias ni retirar sus protecciones.	

En caso de encontrar averías, si corrección demora menos de 30 min corregir durante el día y si corrección demora más se debe crear OT (crear aviso M2).

Punto de mayor riesgo | Chequeo de calidad | Inspección visual
Inspección auditiva | Vibropen | Pistola o cámara termográfica

Se adjuntaron a los planes HTE de inspección a bombas centrifugas, agitadores o repulpadores, reductores, motores eléctricos, unidades hidráulicas, transmisores, válvulas de control, válvulas manuales, uniones con flange, y, además, HTE de rutinas de lubricación de bombas centrifugas, motores y acoplamientos.

10.1.1.1. Planes de mantenimiento de baja frecuencia

Las tareas de mantenimiento preventivo y por condición con una frecuencia menor a 12 semanas se programarán como Planes de Mantenimiento Preventivo según la nomenclatura en SAP PM. Estos planes deberán poseer como requisito mínimo los siguientes documentos de control de calidad:

- Pauta de Trabajo de Mantenimiento (PTM)
- Listas de control de Recepción (CLR, por sus siglas en ingles)

Para trabajos de mantenimiento que se requiera personal externo en el desarrollo de las actividades, además se deberá adjuntar:

- Especificaciones Técnicas (EETT)

Las pautas de trabajo de mantenimiento consisten en procedimientos que describen una secuencia lógica de instrucciones u operaciones que sirven de guía para realizar una determinada tarea técnica, asegurando condiciones de calidad y seguridad. Cada operación debe ser clara, concisa y entendida por el personal que la efectuará.

Un PTM evita el olvido de tareas, repuestos, herramientas o uso de insumos, sirve para ajustar el tiempo de ejecución de trabajos y optimiza el tiempo de preparación.

Tabla 32. Pauta de Trabajo de Mantenimiento según formato ARAUCO, para un cambio de embrague de los rodillos de retorno de la secadora.

PAUTA DE TRABAJO DE MANTENCION (PTM)

Ubicación Técnica / Equipo:	CA02-400-403-010-27251603 al 27251625	Revisión :	Registro :
Descripción UTEC / Equipo:	RODILLO DE RETORNO	Correlativo :	Hoja Nº : de

TRABAJO A REALIZAR : Nº Personas : 3 — Tiempo Total : 3 horas

CAMBIO DE EMBRAGUE DE RODILLO DE RETORNO

PREPARATIVOS

- A.- Gestionar realización PTC, PPA y EE
- B.- Realizar charla de 5 min y capacitación al personal sobre tarea a realizar.
- C.- Realizar traslado de Repuestos a terreno.
- D.- Realizar, traslado de chequeo de herramientas y equipos.
- E.- Validación por planta para uso de Tecle palanca de 1 tonelada
- F.- Montaje de Tecle para realizar maniobra
- G.- Solicitar modificación de andamios y tarjeta de habilitación
- H.- Señalización de área de trabajo
- I.- Solicitar a operaciones la entrega de equipo y limpieza de este.
- J.- Bloqueo de equipo (**272-31-174** y **272-31-176**)

EVALUACIÓN AMBIENTAL

K.-	**Aspecto Ambiental :**	No aplica.
L.-	**Impacto Ambiental :**	No aplica.
M.-	**Identificación del residuo / destino :**	Centros de acopios respectivos, tarros de colores.
N.-	**Control de derrames :**	No aplica.

REPUESTOS E INSUMOS

- Embrague Tsubaki MZEU50-TK
- Desengrasador
- Paños de limpieza 1 paquete
- Lubricante de cadena
- Liquido penetrante para soltar pernos

HERRAMIENTAS

- 1 Tecle de 1 tonelada
- Llaves con dados
- Maceta
- Equipo Porta Power
- 2 Barretilla
- Martillo
- Alógeno
- Extensión 220 v
- Juego llaves punta corona en mm e in
- Elementos de protección personal (EPP)
- Atornillador
- Eslingas
- Grilletes

Unidad de Tiempo [min]

	ACTIVIDAD	TPO	PER	PTR	RECURSO	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
1	Preparativos y Traslado de Herramientas al punto de trabajo	15	2	124	Mecánico		x											
2	Pedir el equipo a intervenir a operaciones y verificar bloqueo de equipo	5	2	124	Mecánico			x										
3	**PD: Comprobar fijación del cinturón de seguridad a estructura.**	**5**	2	124	Mecánico			x										
4	Limpieza de área de trabajo antes de comenzar a trabajar	5	2	124	Mecánico			x										
5	**PD: Verificar bloqueo de plataforma de elevación (Ascensor)**	**5**	2	124	Mecánico				x									
6	Soltar tensor de cadena y retirarla del Sprocket del embrague	10	2	124	Mecánico				x									
7	Realizar limpieza con liquido Desengrasador de cadena retirada con ayudante o lubricador	30	2	170	Lubricador					x	x							
8	Limpiar Sprocket tensor de residuos de lubricante o celulosa e inspeccionar estado de cadenas	5	2	124	Mecánico					x								
9	Limpiar de embrague antes retirar y soltar de perno de fijación al eje	5	2	124	Mecánico					x								
10	Fijar eslinga a embrague y dejar maniobra lista con tecle palanca	5	2	124	Mecánico					x								
11	Instalar machina con porta Power o extractor trípode para retiro de embrague y soltarlo	10	2	124	Mecánico						x							
12	Retirar embrague del eje del rodillo	10	2	124	Mecánico						x	x						
13	Limpiar todo el sector circundante antes de montar el embrague	5	2	124	Mecánico							x						
14	**PC: Se verifico tolerancia f7 en el eje +0,000 -0,025**	5	2	124	Mecánico													
15	**PD: Verificar sentido de giro antes de montar el embrague**	**5**	2	124	Mecánico							x						
16	Montar embrague y poner perno de fijación al eje	15	2	124	Mecánico								x					
17	**PD: Girar embrague de manera manual y verificar bloqueo en sentido contrario**	**5**	2	124	Mecánico									x				
18	Instalar y tensar cadenas de accionamiento	10	2	124	Mecánico									x				
19	**PD: Verificar holgura y tensión de cadena. 20[mm] a 30[mm] de flecha.**	**5**	2	124	Mecánico										x			
20	Lubricar cadena de accionamiento	5	2	170	Lubricador										x			
21	**PD: Verificar giro de rodillo desde puertas de inspección**	**5**	2	124	Mecánico										x			
22	Limpieza del área de trabajo y retiro de herramientas	15	2	124	Mecánico											x		
23	Retirar bloqueo de ascensor	5	2	124	Mecánico												x	
24	Desbloquear equipo	10	2	124	Mecánico												x	
25	Entregar equipo a operaciones	10	2	124	Mecánico													x
26	Cerrar PTC	5	2	124	Mecánico													x

EVALUACION DE RIESGOS SEGÚN MATRIZ DE RIESGOS

	RIESGOS	MEDIDAS DE CONTROL
M.-	**Golpeado por**	Atento a las consideraciones del entorno, uso correcto de EPP.
N.-	**Atrapado entre**	Coordinación en el trabajo de equipo, asilamiento y bloqueo, uso de E
O.-	**Caida distinto nivel**	Uso de arnés de seguridad con 2 colas, atento a las condiciones de e
P.-	**Sobresfuerzo**	No levantar mas de 25 kg, posición adecuada del trabajo.
Q.-	**Proyección de particulas**	Uso de Careta facial, lentes sellados y mascarilla desechable.
R.-	**Trabajo en caliente**	Uso de traje de cuero, guantes de cuero, y careta de soldar.
S.-		

APROBACIÓN

Generó y/o Revisó: Sergio Valenzuela N. Pablo Monsalve J.

Aprobó:

MEJORAS PRÓXIMA OPORTUNIDAD

El grado de detalle de un PTM depende del tipo de tarea, capacidad del personal, tipo de intervención, nivel de calidad exigido y consecuencias de una reparación incorrecta, por lo que debe discutirse en cada caso particular según el contexto.

Las listas de control de recepción son documentos generados para realizar con control de calidad de los trabajos de mantenimiento realizados, verificar pasos importantes y permitir un control de confiabilidad por parte del inspector en terreno.

Tabla 33. Lista de Control de Recepción según formato ARAUCO, para un cambio de motor eléctrico.

arauco

Superintendencia de Servicios Eléctricos y Automatización
Unidad de Instrumentación

HOJA CAMBIO DE MOTOR (CHECK LIST)

CELULOSA ARAUCO - PLANTA ARAUCO

Orden de Trabajo:	**Descripción de la OT:**			**Fecha Ejecución:**
Voltaje Motor:	**TAG:**		**In:**	**Ubicación Técnica:**
	Marca Contactor:	**Frame:**		
Área Macro: Máquina, Línea I -II	**Área de la Planta:** MAQUINA	**Empresa de servicios:** ARAUCO		**Supervisor Arauco:**

Comisionamiento Estático (Antes de Conectar)	✓
¿Frame correcto? (Verificar todas las medidas)	
¿Velocidad correcta y Potencia es correcto?	
¿La tensión del motor es la correcta?	
¿Motor puede ser montado en la Posición requerida?	
¿Rodamiento adecuados para el tipo de servicio a realizar?	
¿Motor en buenas condiciones de Aislación? (Medir Con megger > 100MOhm)	
¿Diferencia de Resistencia de las Bobinas < 5%?	
¿Se realiza prueba de impulso?	
¿Medición de Vibraciones en el motor? (Muy Alta llamar a predictivo)	
¿Medición de Corriente de Vacío en cada una de las fases? (Desbalance < 5%)	
¿Las RTD del motor tiene valores idénticos y concuerdan con la T° ambiente?	
Verificar conexión Δ - Y	
Verificar apriete (Según Tabla de Torque)	
¿Cable a tierra Conectado?	

Comisionamiento Dinámico	✓
¿Sentido de giro correcto (verificación con motor desacoplado)?	
¿Medición de la Corriente de carga?	
¿Medición de la temperatura?	
¿Se verificó la medición de T° en el relé de protección?	
¿Inspección de equipo por parte de predictivo?	
¿Equipo Entregado a operaciones?	
¿Informe de cambio de motor realizado? (Llenar planilla cambio de motor)	
¿Se envio motor a taller electrico?	

Observaciones

Estructura de aprobaciones para la recepción del equipo que garantizan una puesta en servicio segura			
Supervisor ARAUCO	Nombre:	ITO Planta	Nombre:
	Firma:		Firma :
	Fecha y hora:		Fecha y hora :

Se observa que un CLR posee evaluación estáticas y dinámicas, por otro lado, considera aspectos de seguridad y calidad verificadas por un responsable que representa a la empresa.

Ahora bien, las EETT consisten en un precontrato donde se expone de manera detallada los servicios que debe realizar la empresa contratista, las capacidades mínimas que exige Celulosa Arauco, disposición de equipos y plazos de cada etapa del proceso.

Tabla 34. Índice de Especificaciones Técnicas según formato ARAUCO, para una mantención regulatoria de estanques de vapor según Decreto Supremo 10.

ARAUCO Sembremos Futuro	ESPECIFICACIONES TECNICAS MANTENCION ESTANQUE VAPOR DS10	Versión :01 Página : 2 de 17 SGC

INDICE

1. OBJETIVO 3

2. DESCRIPCION DEL SERVICIO 3

2.1 DESCRIPCION GENERAL 3

2.2 EQUIPOS A INTERVENIR 3

2.3 PREPARATIVOS PREVIOS 4

2.4 ACTIVIDADES A DESARROLLAR EN EJECUCION 4

2.5 SUPERVISIÓN EN LA EJECUCIÓN DEL SERVICIO 8

2.6 ASPECTOS RELEVANTES DE SEGURIDAD, MEDIO AMBIENTE Y CALIDAD 9

2.7 COMISIONAMIENTO Y PUESTA EN SERVICIO DE EQUIPOS 10

2.8 RECEPCION DE LOS TRABAJOS 10

3. PERSONAL, EQUIPOS, MATERIALES Y SUMINISTROS 11

3.1 COMPETENCIAS DEL PERSONAL EESS 11

3.2 EQUIPOS, MATERIALES Y SUMINISTROS 12

4. PROGRAMA, DOCUMENTOS Y HORARIO EJECUCIÓN DE TRABAJO 14

4.1 HITOS RELEVANTES 14

4.2 AUTORIZACION (FIRMA) PTC 15

4.3 DOCUMENTOS REQUERIDOS 16

5. PRESENTACION DE LA OFERTA 17

6. AUMENTO DE OBRA 17

7. REFERENCIAS 17

7.1 BASES ADMINISTRATIVAS GENERALES PARA EMPRESAS CONTRATISTAS 17

7.2 NORMATIVA LEGAL APLICABLE 18

7.3 ESTÁNDARES Y DOCUMENTOS TÉCNICOS APLICABLES 18

8 ANEXOS 18

Para cada tarea de mantenimiento se crearon los documentos mínimos requeridos para asegurar seguridad y calidad en el desarrollo de la actividad, para luego ser adjuntados a cada plan de mantenimiento respectivo creado en el Sistema ERP utilizado por la empresa, es decir, SAP PM.

10.2. Plan maestro de mantenimiento

El plan maestro de mantenimiento de Celulosa Arauco y Constitución S.A. se rige por los parámetros preestablecidos propios del contexto de la empresa, descritos previamente en el presente informe.

Vale decir, los trabajos de mantenimiento que requieren detención de los equipos deben programarse en PGP o PA, según el nivel de complejidad. Por otro lado, los departamentos de mantenimiento en el Área Máquina son:

- Mantención Mecánica.
- Mantención Eléctrica e Instrumentación.
- Hidráulica y Lubricación.
- Análisis Predictivo.
- Operaciones.

Los cuales coordinan sus tareas en reuniones semanales, donde el Ingeniero de Confiabilidad ejerce como ente mediador y asegurador de calidad. Las rutas de inspección preventivas son programadas por cada área según sus recursos disponibles, también validadas por la Superintendencia de Confiabilidad.

En el Anexo D, se expone en Plan Maestro de Mantención Mecánica de la Etapa de Secado, donde se segregan las tareas por frecuencia y oportunidad de ejecución. De la misma manera se generan Planes de Mantenimiento para las distintas Áreas.

La programación, a corto plazo, y planificación, a largo plazo, del mantenimiento siempre puede y debe ser mejorada; *se suele decir que un plan de mantenimiento que no se modifica al menos una vez el año es porque no se usa*.

10.3. Incorporación de plan maestro de mantenimiento a ERP SAP PM

Una vez establecido el Plan Maestro de Mantenimiento, se procede a incorporar y programar las tareas en el ERP SAP PM, para esto se debe se crear el Plan Preventivo completando cada una de sus dimensiones, tales como, Equipos, Hojas de Ruta, Componentes y Frecuencias, para luego ser lanzados según la programación más idónea y oportuna para cada plan.

10.3.1. Creación de planes

Los planes de mantenimiento enlazan hojas de ruta y equipos, los cuales llevan asignados la periodicidad de mantenimiento mediante las hojas de ruta, y se programa una fecha de comienzo del plan.

Las hojas de ruta describen una serie de operaciones de mantenimiento que se deben realizar individualmente a cada uno de los equipos de una empresa y que se realizan cada cierto período de tiempo. Con ello, se consigue estandarizar las operaciones a realizar a los equipos, y así también su planificación. Esta puede describir actividades de inspección, operaciones mantenimiento preventivo o correctivo.

Con la creación de las hojas de ruta de mantenimiento, se reduce el tiempo para crear órdenes de trabajo de mantenimiento, ya que una misma hoja de ruta puede ser asignada a distintos equipos que tengan la misma secuencia de operaciones de mantenimiento.

Por ello, si se quiere crear una orden de trabajo de mantenimiento sobre un equipo que tiene unas operaciones de mantenimiento que ya están descritas al detalle en una hoja de ruta, únicamente se asignaría dicha hoja de ruta a la orden a realizar especificando la fecha de inicio y de fin máxima para la realización de la orden. De este modo, el sistema asignará las operaciones de mantenimiento a realizar a esta orden en concreto, la cual tiene establecido el equipo al que se le van a realizar dichas operaciones.

Visualizar instrucción: resumen operaciones

Propia | Externo | Cab. | Plan

GrHRuta 26029 156S CERTIFICACION DS10 ESTANQUES VAPOR ContGrpoHR 1

Resumen general operación

Op.	SOp	PstoTbjo	Ce.	Ctrl	Descripción operación	T..	Trabajo	Un.	Nº	Dur.	Un.	C	%	DistTrbInt	Fac	ClAct	Clv.mod.
0005		927	CE01	PM01	DRENAR LIMPIAR Y ENTREGAR A MANTEN TK	☑	32,0	HH	2	16,0	H	2	100		1	REPARA	NORMAL
0006		124	CE01	PM03	APERTURA Y PREPARATIVOS PH DS10	☑	0,0	HH	2	2,0	H		100		1	REPARA	NORMAL
0007		980	CE01	PM01	MEDIR GASES Y AUTO INGRESO A TK	☑	1,0	HH	1	1,0	H	2	100		1	REPARA	NORMAL
0010		103	CE01	PM07	Instalacion y Retiro Andamios (35M2A)	☐	35,0	M2A	1	35,0	M2A	2	100		1	SERAND	ANDAMIO
0015		407	CE01	PM03	INSPECCIÓN END ESTANQUE	☑	0,0	HH	4	16,0	H		0		1	REPARA	NORMAL
0080		108	CE01	PM01	MANTENCION VALVULA DE SEGURIDAD	☑	4,0	HH	2	2,0	H	2	100		1	REPARA	NORMAL
0090		124	CE01	PM01	CERRAR MANHOLE ESTANQUE	☑	2,0	HH	1	2,0	H	2	100		1	REPARA	NORMAL
0100		124	CE01	PM03	CERTIFICACION DS10	☐	0,0	HH	1	5,0	H		0		1	REPARA	NORMAL
0110		124	CE01	PM03	MANTENCION MEC ESTANQUES DE VAPOR	☑	0,0	HH	0	0,0	H		0		1	REPARA	NORMAL

Figura 54. Hoja de Ruta en SAP PM correspondiente a inspección de estanque con vapor según DS10 cada 3 años [21].

Por ejemplo, la imagen previa, expone todas las actividades que se deben realizar a un estanque con vapor en su interior según el Decreto Supremo 10 del Ministerio de Salud cada 3 años. Esta hoja de ruta luego se debe asociar a los planes de mantenimiento programados para estos tipos de equipos.

Se observa que la hoja de ruta expuesta, 26029, posee una lista de 9 operaciones, a cada una de estas operaciones se debe ingresar, tiempo estimado de duración, horas hombres requeridas y puesto de trabajo responsable. Además, se pueden adjuntar los documentos necesarios para asegurar el desarrollo de las actividades con los estándares de seguridad y calidad requeridos.

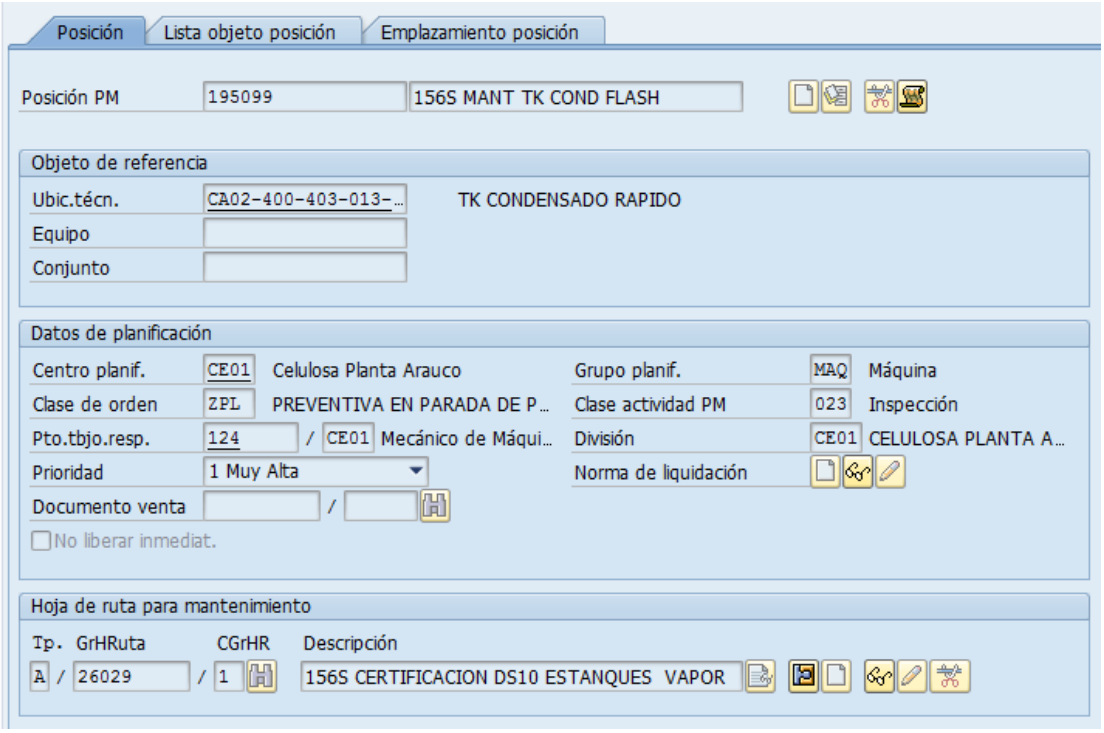


Figura 55. Plan de mantenimiento preventivo en SAP PM, para certificación de estanque de vapor [21].

Se observa que el plan de mantenimiento 195099 tiene adjunta la hoja de ruta 26029, la cual describe los detalles de las labores a realizar.

Por otro lado, el plan de mantenimiento posee, frecuencia, responsable, oportunidad de inspección y centro de costos, además de la ubicación técnica y el o los equipos a los cuales se realizará mantenimiento.

10.3.2. Lanzamiento de planes

Y finalmente, tras la definición del plan de mantenimiento, se realiza la programación de dicho plan a lo largo del tiempo.

El software SAP PM, permite variadas configuraciones para programar los planes de mantenimiento, estas se llaman parametrizaciones.

- En el campo "**Fact. dec. conclusión retr**" se debe ingresar un valor porcentual que indicara la cantidad de tiempo que se debe correr la fecha de toma de la siguiente Orden de mantenimiento si la primera orden aún no ha sido tratada. De esta forma si el valor en este campo es 100%, por cada día que pase se correrá un día también en la fecha de toma de la siguiente orden. **En nuestro caso siempre debe ser 100%.**

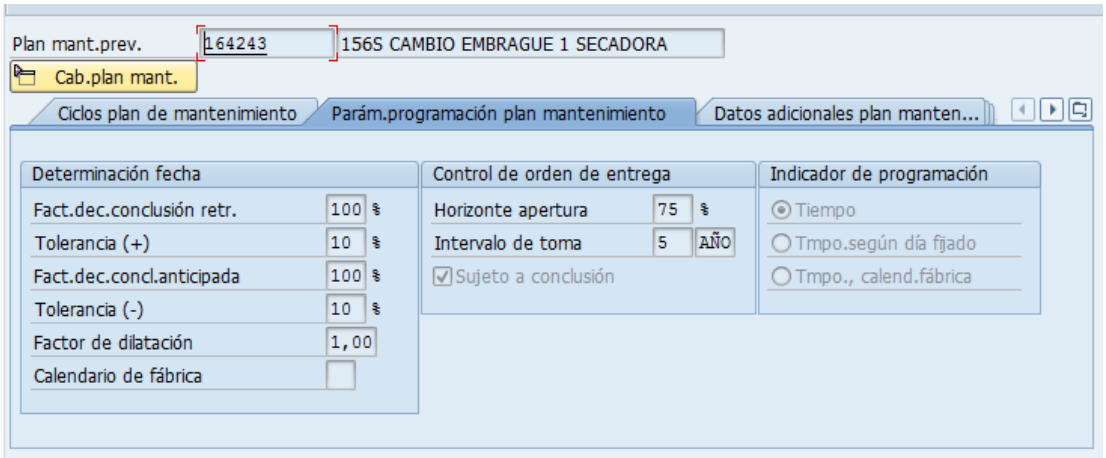


Figura 56. Parametrización de la programación de un plan de mantenimiento en SAP PM [21].

- En el campo "**Fact. dec. Conc. anticipada"** se debe ingresar un valor porcentual que indicara la cantidad de tiempo que se debe correr la fecha de toma de la siguiente Orden de mantenimiento si la primera orden es tratada antes de la fecha impuesta por la programación. De esta forma si el valor en este campo es 100%, por cada día de anticipación que sea tratada la orden se anticipara un día también en la fecha de toma de la siguiente orden. **En nuestro caso siempre debe ser 100%.**
- El "**Factor de Dilatación**" se utiliza como múltiplo del paquete de mantenimiento, p/e si el factor de dilación es igual a 0,5 y el paquete de mantenimiento es una semana, la programación del plan preventivo asumirá que el trabajo se debe ejecutar a cada 3,5 días.

- El **horizonte de apertura** es un valor porcentual que indicara cuanto tiempo antes de la fecha pactada debe ser lanzada la orden, esto para tener preparada la herramienta a utilizar.
- El **intervalo de toma** es el periodo que se muestran las futuras tomas de mantención, p/e si es igual a 5 años, se muestran todas las tomas futuras en ese periodo. Después de ejecutada la última toma de mantención el intervalo se vuelve a actualizar.
- La casilla de verificación de **Sujeto a Conclusión** indica que la siguiente orden de mantenimiento no se lanzara hasta que la primera no haya sido cerrada técnicamente
- El **indicador de programación** permite elegir la forma en que se contabilizaran las de toma de las diferentes órdenes.
    - **Tiempo:** Le suma el valor del ciclo a cada fecha de toma siguiente.
    - **Según día fijado**: Las ordenes se lanzarán en una fecha exacta cada mes sin importar de que día se trata, si es laboral o no.
    - **Tmpo. Calend. Fabrica**: Le suma el valor del ciclo a cada fecha de toma siguiente, pero tiene en cuenta los días no laborales, es decir que solo suma días laborales.

Programados los parámetros expuestos el plan de mantenimiento queda en condiciones para ser iniciado en la fecha que estime conveniente el Planificador del Área Máquina.

CONCLUSIONES

El diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, si bien, como su nombre lo dice, busca aumentar la confiabilidad de los equipos y que estén disponibles para realizar sus funciones cuando se requiere, va más allá de ello y realiza un cambio cultural en los Departamentos de Mantención, expone lineamientos nuevos que se tomarán en cuenta al momento de pensar en mantenimiento.

Por otro lado, un plan RCM produce una reducción en los costos de mantenimiento ya que se considera solo las tareas que se deben hacer estrictamente para mantener funcionado el activo, reduciendo tiempos de reparación, frecuencias y redundancias de actividades.

La Superintendencia de Confiabilidad tiene como fin del presente trabajo, aumentar disponibilidad técnica de la etapa de secado aumentando la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos. En su desarrollo, también aumento de manera considerable el conocimiento de los operadores en torno al proceso, a su vez, la diversas reuniones y mesas de trabajo, fomento el traspaso horizontal de información de las distintas áreas, ya sea, mecánicos, electro-control, lubricación, predictivo u operaciones; lo cual aumentará sin duda la confiabilidad humana y del proceso, por consiguiente, la disponibilidad operacional.

Un aumento en la disponibilidad del Área Máquina, en donde se encuentra la Etapa de Secado, y si se mantiene a su vez el forecast de aumento en la demanda del mercado de celulosa [11], significaría un aumento en el EBITDA de la empresa. Sin embargo, debido a la incertidumbre mundial, la guerra comercial entre USA y China, y conflictos bélicos en Medio Oriente, la realidad podría discrepar de este forecast tan auspicioso, no obstante, como se mencionó, el desarrollo del presente trabajo no solo significa un aumento en la disponibilidad, si no que trae por añadidura otros beneficios en pro de la confiabilidad operacional.

La Confiabilidad Operacional se define como una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, técnicas de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial. La Confiabilidad Operacional lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional [31].

La Gestión y Confiabilidad de Activos que busca el presente trabajo, es solo una de las aristas para lograr la Confiabilidad Operacional; la Confiabilidad Humana, de Procesos y Diseño se deben trabajar de manera integral por la empresa si se aspira a la excelencia operacional.

Ahora bien, un plan de mantenimiento debe ser actualizado constantemente en función del contexto, por lo que, si esto no se realiza, al menos de manera anual, queda obsoleto de manera temprana.

Uno de los principales aliados de un plan de mantenimiento es la gestión de repuestos, herramientas e insumos, lo cual no se logró ver a profundidad en el presente, por lo que se recomienda desarrollar un proyecto enfocado en la gestión de stock según planes preventivos propuestos e implementados en el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.

REFERENCIAS

[1] INTERNATIONAL Organization for Standardization. Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224:2016. Ginebra, Suiza, 2016. 272 p.

[2] UNITED States Defense Standard. Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. MIL-STD-1629A. Washington DC, USA, 1980. 74 p.

[3] SOCIETY of Automotive Engineers. Evaluation Criteria for Reliability Centered Maintenance (RCM) Processes. SAE JA1011:1999. Pensilvania, USA, 1999. 13 p.

[4] SOCIETY of Automotive Engineers. A Guide to the Reliability Centered Maintenance (RCM) Standard. SAE JA1012:2002. Pensilvania, USA, 2002. 62 p.

[5] PISTARELLI, Alejandro J. Manual de Mantenimiento - Ingeniería, Gestión y Organización. 10a. ed. Buenos Aires, Argentina. RyC, 2013. 693 p.

[6] ARAUCO. Memoria Anual 2018. Santiago, Chile, 2018. 304 p.

[7] OSSES, Miguel. Producción de celulosa Kraft: Maquina de Celulosa [diapositivas]. Arauco, Chile. Celulosa Arauco y Constitución S.A, 2018. 136 diapositivas, color.

[8] NEIRA, Raúl y MUÑOZ, Luciano. Mantención Mecánica: Secadora de Pulpa. Nueva Aldea, Chile. Celulosa Arauco y Constitución S.A., 2005. 57 p.

[9] TSUBAKIMOTO Europe. Tsubaki cam clutches: Ruedas libres: Serie BB-TSS-TFS-BR. Netherlands, 2002. 8p.

[10] ANDRITZ. Fläkt Dryer: World leading pulp drying technology. Växjö, Suecia, 2011. 8p.

[11] LEWIS, Richard. La industria de celulosa: certeza e incertidumbre. En: XIV Simposio de la industria de la celulosa y el papel. (14°, 2002, Chile). CORMA y CMPC, 2002. 32 p.

[12] VALMET Forward. DryWay airborne dryer [en línea]. Valmet Corporation. <https://www.valmet.com/pulp/pulp-drying/drying/?page=1> [consulta: 28 octubre 2019].

[13] MORALES Retamal, Sergio Enrique. Generación y desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo en base a criticidad, según criterios de estadísticas de falla en empresa química Clariant. Tesis (Ingeniero Civil Mecánico Mención Producción). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Mecánica, 2017. 254 pp.

[14] DÍAZ Valenzuela, Matías Patricio. Análisis de datos en servicio de confiabilidad prestado a una planta de remoción de ripios. Tesis (Ingeniero Civil Industrial). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Industrias, 2016. 118 pp.

[15] VILLAROEL Jara, Carlos. Estudio de propuesta de mejora en sistema de sello de bomba centrifuga Sulzer app3. Tesis (Ingeniero de Ejecución en Mantenimiento Industrial). Concepción. UFTSM, Departamento de Mecánica, 2018. 69 pp.

[16] FIGUEROA Barra, Juan Carlos. Estudio de mantenimiento basado en la confiabilidad acorde al sistema asset management aplicado a la flota de bulldozer cat d10t. Tesis (Ingeniero Civil Mecánico). Concepción. UBB, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2014. 111 pp.

[17] GALLEGOS, Daniel Jiménez. Propuesta de un plan de mantenimiento basado en riesgos y análisis de fallas para la prensa de lavado de la línea 2. Tesis (Ingeniero Civil Mecánico). Concepción. UBB, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2018. 90 pp.

[18] SUPERINDENTENCIA de Confiabilidad. Nueva Superintendencia de Confiabilidad 2019 [diapositiva]. Arauco, Chile. Celulosa Arauco y Constitución S.A., 2019. 87 diapositivas, color.

[20] HÖST, Bertil y WIESLANDER, Peter. Manual de Operación y Mantenimiento Secadora Fläkt. Suecia, ABB Fläkt Industri AB, 1978. 65 pp.

[21] GALLARDO, Hernán. SAP ERP: Módulo Plant Maintenance [en línea]. <https://www.sap.com/latinamerica/index.html> [Consulta: 8 Noviembre 2019].

[22] BALLESTEROS Roble, Francisco. Errores típicos de la interpretación de la curva P-F [en línea]. Industria Química: Equipos y plantas de procesos. España, febrero 2016. 32. <https://www.industriaquimica.es/kiosco/revista32#.Xg06B0dKhPa> [consulta: 8 Noviembre 2019].

[23] ARCADIS Chile y CELULOSA Arauco y Constitución S.A. Resumen ejecutivo: Estudio de impacto ambiental proyecto modernización ampliación planta Arauco [en línea]. <https://seia.sea.gob.cl/archivos/4c0_Resumen_Ejecutivo.pdf> [consulta: 8 Noviembre 2019].

[24] MOUBRAY, John. Reliability-centred Maintenance. 2da. ed. United Kingdom, Aladon Ltd, 1997. 446 pp.

[25] BARRINGER, H. Paul. Availability, Reliability, Maintainability, and Capability [en línea]. <http://www.barringer1.com/pdf/ARMandC.pdf> [consulta: 8 Noviembre 2019].

[26] FOOD and Agriculture Organization of the United Nations. Datos Sobre alimentación y agricultura [en línea]. < http://www.fao.org/faostat/en/#home> [consulta: 8 Noviembre 2019].

[27] SPLETTSTOESSER, Thomas. Lignocellulose [fotografía]. Berlín, Alemania. Scistyle, 2016. 2 fotos, color.

[28] ARAUCO. Informe diario de producción Planta Arauco. Arauco, Chile. Superintendencia de Producción, 2019. 3 pp.

[29] ARAUCO. Presentación Roeadshow [diapositiva]. Chile. Celulosa Arauco y Constitución S.A., 2018. 32 diapositivas, color.

[30] SARNELLI, Robert. Células de carga para medir en condiciones reales [en línea]. <https://library.e.abb.com/public/4012fe537266a561c1256ddd00346dd6/52-59%20M720%20-%20SPA.pdf> [consulta: 8 noviembre 2019].

[31] DURÁN, José Bernardo. ¿Qué es Confiabilidad Operacional? Revista Club Mantenimiento. Año 1. N.º 2. Septiembre 2000.

ANEXOS

Anexo A: Fallas funcionales y sus respectivos modos de fallas de los Rodillos de Retorno.

Equipo	Falla Funcional	ID	Modo de Falla
Rodillo de Retorno de Salida	Daña la hoja de celulosa	1	Manto de polín desgastado o con grietas por uso normal
Rodillo de Retorno de Salida	Desconecta solo parcialmente el accionamiento de los rodillos cuando finaliza la etapa de enhebrado	2	Desgaste en muñón en zona de embrague por ajuste inadecuado
		3	Dientes de sprocket de embrague irregulares por residuos de celulosa por acumulación de pulpa
		4	Sprocket dañado por tensión excesiva en cadena
		5	Sprocket de embrague dañado por cadena mal especificada
Rodillo de Retorno de Salida	Impulsa la hoja de celulosa con variaciones de velocidad e inferior que 0,6±0,1[%] menor que la velocidad de los rodillos de retorno	6	Cadena de accionamiento de polea de enhebrado dañada, pasadores girados, rotos u orificios agrandados por sobrecarga
		7	Cadena de accionamiento de polea de enhebrado dañada, pasadores girados, rotos u orificios agrandados por sobrecarga
		8	Comba de polea de enhebrado gastada por uso normal
		9	Desplazamiento de cinta por vibraciones excesivas en la polea por soltura de pernos de fijación
		10	Sprocket de accionamiento de polea de enhebrado dañado por cadena mal especificada
		11	Sprocket de accionamiento de polea de enhebrado dañado por tensión excesiva en cadena
Rodillo de Retorno de Salida	Incapaz de guiar la hoja de celulosa a lo largo de la secadora	12	Rodamiento del descanso trabado por desgaste de componentes por fin de vida útil
		13	Rodamiento en descanso trabado por desgaste de componentes por degradación de grasa por uso normal
		14	Rodamiento en descanso trabado por desgaste de componentes por degradación de grasa por uso normal
		15	Rodamiento en descanso trabado por desgaste por mal ajuste en su instalación
		16	Rodamiento en descanso trabado por desgaste por mal ajuste en su instalación

Equipo	Falla Funcional	ID	Modo de Falla
Rodillo de Retorno de Salida	Incapaz de impulsar la punta de hoja a través de la secadora	17	Cadena de accionamiento de polea de enhebrado trabada por corrosión por falta de lubricación
		18	Cadena de accionamiento de polea de enhebrado trabada por desgaste en sprocket por desalineamiento
		19	Cadena de accionamiento de polea de enhebrado trabada por falta de tensión por elongación en su uso normal
		20	Cadena de accionamiento de polea de enhebrado trabada por holgura por tensión insuficiente
		21	Cadena de accionamiento de polea de enhebrado trabada por residuos de celulosa por protección en mal estado o ausencia de esta
		22	Corte de cadena de accionamiento de polea de enhebrado por deterioro de componentes por tensión excesiva
		23	Corte de cadena por corrosión o desgaste por polución de celulosa acumulada en sprocket por falta de limpieza
		24	Corte de cadena por corrosión o desgaste por uso de lubricación no adecuada por falta de stock en bodega
		25	Corte de cadena por corrosión por falta de lubricación
		26	Polea de enhebrado trabada por interferencia con polín por mal alineamiento
		27	Polea de enhebrado trabada por interferencia con polín por mal alineamiento
		28	Rodamiento de polea de enhebrado trabado por desgaste por mal ajuste en su instalación
		29	Rodamiento de polea de enhebrado trabado por rotura por falta de lubricación
		30	Rodamiento de polea de enhebrado trabado por rotura por uso normal
		31	Sprocket tensor de cadena de accionamiento de polea de enhebrado trabado por fin de vida útil de su rodamiento, por uso normal
Rodillo de Retorno de Salida	No desconecta el accionamiento de rodillos cuando finaliza la etapa de enhebrado	32	Rodamiento de embrague trabado por deterioro de componentes por fin de vida útil por uso normal
		33	Rodamiento de embrague trabado por falta de lubricación por cantidad insuficiente de lubricante
		34	Rodamiento de embrague trabado por falta de lubricación por fuga de lubricante
		35	Rodamiento de embrague trabado por falta de lubricación por lodos de lubricante en elementos rodantes
		36	Rodamiento de embrague trabado por uso normal
		37	Trinquete de embrague en mal estado por uso normal
		38	Trinquete de embrague en mal estado por uso normal

Equipo	Falla Funcional	ID	Modo de Falla
Rodillo de Retorno de Salida	No es capaz de guiar la hoja de celulosa a velocidad constante a lo largo de la secadora	39	Desgaste de muñón en zona de rodamientos por soltura de rodamientos por manguito suelto en el eje
		40	Desgaste de muñón en zona de rodamientos por soltura de rodamientos por manguito suelto en el eje
		41	Desgaste de muñón en zona de rodamientos por soltura de rodamientos por manguito suelto en el eje
		42	Endurecimiento de retenes de caja de rodamientos en descansos por ambiente de trabajo con alta temperatura
		43	Endurecimiento de retenes de caja de rodamientos por ambiente de trabajo con alta temperatura
		44	Roce entre aro exterior del rodamiento en descanso con soporte, por rodamiento en mal estado o mala instalación
		45	Roce entre aro exterior del rodamiento en descanso con soporte, por rodamiento en mal estado o mala instalación
Rodillo de Retorno de Salida	No transmite tracción de manera constante a la hoja de celulosa	46	Cadena de accionamiento de rodillo dañada, pasadores girados, rotos u orificios agrandados por sobrecarga
		47	Pernos de fijación de embrague sueltos por torque insuficiente por mala instalación
Rodillo de Retorno de Salida	No transmite tracción a la hoja de celulosa	48	Cadena de accionamiento de rodillo trabada por corrosión por falta de lubricación
		49	Cadena de accionamiento de rodillo trabada por desgaste en sprocket por desalineamiento
		50	Cadena de accionamiento de rodillo trabada por desgaste en sprocket por desalineamiento
		51	Cadena de accionamiento de rodillo trabada por falta de tensión por elongación en su uso normal
		52	Cadena de accionamiento de rodillo trabada por falta de tensión por elongación en su uso normal
		53	Cadena de accionamiento de rodillo trabada por holgura por tensión insuficiente
		54	Corte de cadena de accionamiento de rodillo por deterioro de componentes por tensión excesiva
		55	Corte de cadena de accionamiento de rodillo por corrosión o desgaste por polución de celulosa acumulada en sprocket por falta de limpieza
		56	Corte de cadena de accionamiento de rodillo por corrosión o desgaste por uso de lubricación no adecuada por falta de stock en bodega
		57	Corte de cadena de accionamiento de rodillo por desgaste de sus componentes por corrosión por falta de lubricación.
Rodillo de Retorno de Salida	Transmite tracción deficiente a la hoja de celulosa.	58	Desalineamiento de polín entre descansos, de forma axial o radial.
		59	Rodillo flectado por golpe durante la instalación

Anexo B: Consecuencia de los modos de falla y la estrategia de mantenimiento determinada según el diagrama de decisión.

ID	Consecuencia	Tipo de Mantención	Tarea propuesta	Frecuencia	Responsable
1	IV	Mantención por Condición	Inspección predictiva a polín de retorno	3 meses	Técnico Predictivo
2	VI	Cambio de Diseño	Cambio de embrague y asegurar verificación de ajuste de embrague a procedimiento de instalación. Verificar retenes y cambiar de ser necesario.	N/A	Técnico Mecánico
3	V	Mantención Preventiva	Realizar limpieza en ruta de lubricación.	4 meses	Técnico Mecánico
4	V	Mantención por Condición	Asegurar alineación del sprocket y verificar estado de cadena, según elongación, tensión, estado de pasadores y presencia de corrosión.	1 año	Técnico Mecánico
5	V	Mantención por Condición	Asegurar especificación de cadena en plan preventivo de PGP, y en CLR de control de calidad	1 año	Técnico Mecánico
6	V	Mantención Preventiva	Cambio de cadena preventivo cada 2 años.	2 años	Técnico Mecánico
8	IV	Mantención por Condición	Inspección visual de estado de la polea, evaluar rugosidad.	6 meses	Técnico Mecánico
12	III	Mantención por Condición	Medición de vibraciones por predictivo	3 meses	Técnico Predictivo
13	III	Mantención Preventiva	Cambio de grasa e inspección de rodamientos	1 año	Técnico Lubricador
14	III	Mantención Preventiva	Reengrase en ruta de lubricación	4 meses	Técnico Lubricador
15	III	Cambio de Diseño	Asegurar calidad en montaje según procedimiento de cambio de rodamientos en polines de secadora. (revisar cambio de rodamiento actual)	N/A	Técnico Mecánico
16	III	Mantención Correctiva	Cambio de rodamiento según condición, establecer procedimiento, en donde se verifiquen tolerancias en el montaje del rodamiento.	N/A	Técnico Mecánico
17	III	Mantención Preventiva	Ruta de lubricación cadenas con Chesterton C 601	4 meses	Técnico Lubricador
21	III	Mantención por Condición	Inspección visual de embrague, giro regular y temperatura, fugas de lubricante y estado de cadena.	2 semanas	Técnico Mecánico

ID	Consecuencia	Tipo de Mantención	Tarea propuesta	Frecuencia	Responsable
24	III	Mantención Preventiva	Asegurar stock de lubricante adecuado en bodega, coordinar con Jefe Mecánico de Maquina	4 meses	Técnico Lubricador
25	III	Mantención Preventiva	Ruta de lubricación cadenas con Chesterton C 601	4 meses	Técnico Lubricador
26	III	Mantención por Condición	Verificar alineación de polea en parada de área,	6 meses	Técnico Mecánico
27	III	Mantención por Condición	Verificar alineación de polea en PGP, e inspeccionar pines de alineamiento.	Cada 1 año	Técnico Mecánico
28	III	Cambio de Diseño	Establecer procedimiento en donde se verifiquen tolerancias en el montaje del rodamiento. HTE y CLR	N/A	Técnico Mecánico
29	III	Mantención Preventiva	Ruta de lubricación, verificar cantidad y tipo de lubricante aplicado, según especificaciones.	4 meses	Técnico Lubricador
30	III	Mantención por Condición	Medición predictiva en rodamientos de polea, antes de partida cada 6 meses.	3 meses	Técnico Predictivo
31	III	Mantención Preventiva	Cambio de rodamiento sellado de sprocket tensor.	5 años	Técnico Mecánico
32	III	Mantención Preventiva	Cambio de embrague preventivo.	3 años	Técnico Mecánico
33	III	Mantención Preventiva	Ruta de lubricación embrague de rueda libre con grasa, asegurar calidad. Incluir especificación en ruta	4 meses	Técnico Lubricador
34	III	Mantención Correctiva	Cambio de embrague y asegurar verificación de ajuste de embrague a procedimiento de instalación. Verificar retenes y cambiar de ser necesario.	N/A	Técnico Mecánico
35	III	Mantención Preventiva	Desmontar, desarmar y lavar todos los embragues de rueda libre con aceite. Cambiar retenes de embrague y controlar estado de rodamiento.	3 años	Técnico Mecánico
36	III	Mantención por Condición	Inspección visual de embrague, giro regular y temperatura, fugas de lubricante y estado de cadena.	2 semanas	Técnico Mecánico
38	III	Mantención Correctiva	Cambio de embrague y asegurar verificación de ajuste de embrague a procedimiento de instalación. Verificar retenes y cambiar de ser necesario.	N/A	Técnico Mecánico
39	VI	Mantención por Condición	Medición de vibraciones por predictivo	3 meses	Técnico Predictivo
40	VI	Mantención por Condición	Inspección visual de estado de pernos, fugas de grasa, medir vibraciones y temperatura.	2 semanas	Técnico Mecánico

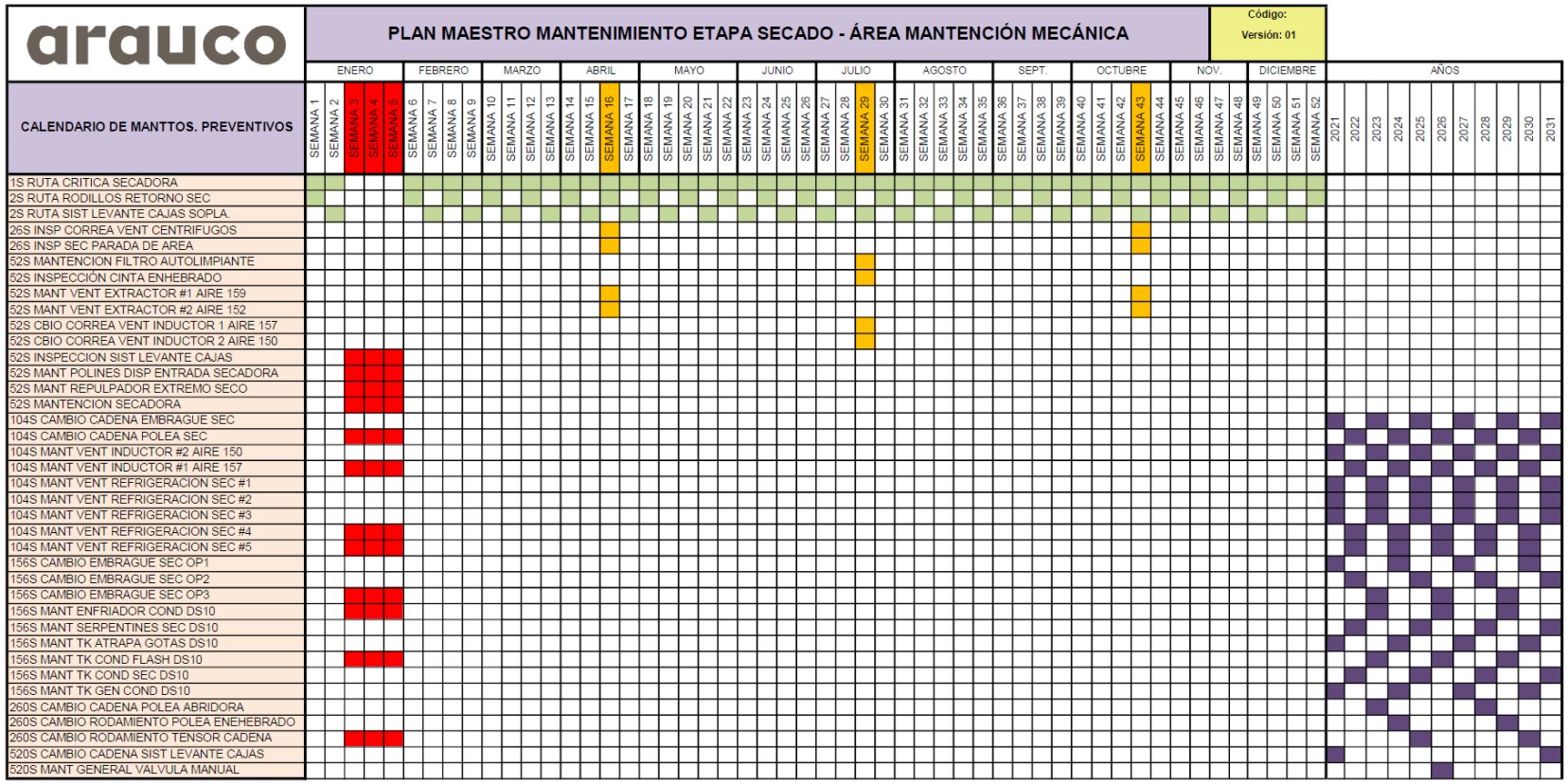
ID	Consecuencia	Tipo de Mantención	Tarea propuesta	Frecuencia	Responsable
41	III	Cambio de Diseño	Asegurar calidad en montaje según procedimiento de cambio de rodamientos en polines de secadora. (revisar cambio de rodamiento actual)	N/A	Técnico Mecánico
42	VI	Mantención Preventiva	Inspeccionar estado de retén y programar cambio de ser necesario con mecánico.	4 meses	Técnico Lubricador
43	VI	Mantención Preventiva	Inspeccionar estado de retén y programar cambio de ser necesario	2 semanas	Técnico Mecánico
44	VI	Cambio de Diseño	Asegurar calidad en montaje según procedimiento de cambio de rodamientos en polines de secadora. (revisar cambio de rodamiento actual)	N/A	Técnico Mecánico
45	VI	Mantención Correctiva	Cambio de rodamiento según condición, establecer procedimiento, en donde se verifiquen tolerancias en el montaje del rodamiento.	N/A	Técnico Mecánico
47	IV	Mantención por Condición	Inspección visual de embrague, giro regular y temperatura, fugas de lubricante y estado de cadena. Aseguramiento de calidad, poner torque o estándar en CLR o HTE	2 semanas	Técnico Mecánico
48	III	Mantención Preventiva	Ruta de lubricación cadenas, limpiar y relubricar.	4 meses	Técnico Lubricador
49	III	Mantención por Condición	Inspeccionar desalineamiento excesivo entre embragues.	2 semanas	Técnico Mecánico
51	III	Mantención Preventiva	Cambio de cadena de embragues cada 2 años	2 años	Técnico Mecánico
55	III	Mantención Preventiva	Ruta de lubricación cadenas, limpiar y relubricar.	4 meses	Técnico Lubricador
56	III	Mantención Preventiva	Asegurar stock de lubricante adecuado en bodega, coordinar con Jefe Mecánico de Maquina	4 meses	Técnico Lubricador
57	III	Mantención Preventiva	Ruta de lubricación cadenas, limpiar y relubricar.	4 meses	Técnico Lubricador
58	VI	Mantención por Condición	Realizar inspección de alineamiento de polines según recomendación del fabricante. Evaluar mejor tecnología para realizarlo (Topografía o sistema PARALING®)	5 años	Técnico Mecánico
59	VI	Mantención Correctiva	Enderezar rodillo en maestranza mediante puntos calientes	N/A	Maestranza

Anexo C: Paquetización de las tareas de mantenimiento en función de la "Cabecera de Orden de Trabajo".

ID	Tarea propuesta	Frecuencia	Responsable	Nombre de OT
1	Inspección predictiva a polín de retorno	3 meses	Técnico Predictivo	12S RUTA PREDICTIVA POLINES
2	Cambio de embrague y asegurar verificación de ajuste de embrague a procedimiento de instalación. Verificar retenes y cambiar de ser necesario.	N/A	Técnico Mecánico	N/A
3	Realizar limpieza en ruta de lubricación.	4 meses	Técnico Mecánico	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
4	Asegurar alineación del sprocket y verificar estado de cadena, según elongación, tensión, estado de pasadores y presencia de corrosión.	1 año	Técnico Mecánico	52S MANTENCION SECADORA
5	Asegurar especificación de cadena en plan preventivo de PGP, y en CLR de control de calidad	1 año	Técnico Mecánico	52S MANTENCION SECADORA
6	Cambio de cadena preventivo cada 2 años.	2 años	Técnico Mecánico	104S CAMBIO CADENA POLEA SEC
8	Inspección visual de estado de la polea, evaluar rugosidad.	6 meses	Técnico Mecánico	26S INSP SEC PARADA DE AREA
12	Medición de vibraciones por predictivo	3 meses	Técnico Predictivo	12S RUTA PREDICTIVA POLINES
13	Cambio de grasa e inspección de rodamientos	1 año	Técnico Lubricador	52S MANTENCION SECADORA
14	Reengrase en ruta de lubricación	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
15	Asegurar calidad en montaje según procedimiento de cambio de rodamientos en polines de secadora. (revisar cambio de rodamiento actual)	N/A	Técnico Mecánico	N/A
16	Cambio de rodamiento según condición, establecer procedimiento, en donde se verifiquen tolerancias en el montaje del rodamiento.	N/A	Técnico Mecánico	N/A
17	Ruta de lubricación cadenas con Chesterton C 601	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
21	Inspección visual de embrague, giro regular y temperatura, fugas de lubricante y estado de cadena.	2 semanas	Técnico Mecánico	2S RUTA RODILLOS RETORNO SEC
24	Asegurar stock de lubricante adecuado en bodega, coordinar con Jefe Mecánico de Maquina	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA

ID	Tarea propuesta	Frecuencia	Responsable	Nombre de OT
25	Ruta de lubricación cadenas con Chesterton C 601	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
26	Verificar alineación de polea en parada de área,	6 meses	Técnico Mecánico	26S INSP SEC PARADA DE AREA
27	Verificar alineación de polea en PGP, e inspeccionar pines de alineamiento.	Cada 1 año	Técnico Mecánico	52S INSPECCIÓN CINTA ENHEBRADO
28	Establecer procedimiento en donde se verifiquen tolerancias en el montaje del rodamiento. HTE y CLR	N/A	Técnico Mecánico	N/A
29	Ruta de lubricación, verificar cantidad y tipo de lubricante aplicado, según especificaciones.	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
30	Medición predictiva en rodamientos de polea, antes de partida cada 6 meses.	3 meses	Técnico Predictivo	12S RUTA PREDICTIVA POLINES
31	Cambio de rodamiento sellado de sprocket tensor.	5 años	Técnico Mecánico	260S CAMBIO RODAMIENTO TENSOR CADENA
32	Cambio de embrague preventivo.	3 años	Técnico Mecánico	156S CAMBIO EMBRAGUE SEC OP2
33	Ruta de lubricación embrague de rueda libre con grasa, asegurar calidad. Incluir especificación en ruta	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
34	Cambio de embrague y asegurar verificación de ajuste de embrague a procedimiento de instalación. Verificar retenes y cambiar de ser necesario.	N/A	Técnico Mecánico	N/A
35	Desmontar, desarmar y lavar todos los embragues de rueda libre con aceite. Cambiar retenes de embrague y controlar estado de rodamiento.	3 años	Técnico Mecánico	156S CAMBIO EMBRAGUE SEC OP2
36	Inspección visual de embrague, giro regular y temperatura, fugas de lubricante y estado de cadena.	2 semanas	Técnico Mecánico	2S RUTA RODILLOS RETORNO SEC
38	Cambio de embrague y asegurar verificación de ajuste de embrague a procedimiento de instalación. Verificar retenes y cambiar de ser necesario.	N/A	Técnico Mecánico	N/A
39	Medición de vibraciones por predictivo	3 meses	Técnico Predictivo	12S RUTA PREDICTIVA POLINES

ID	Tarea propuesta	Frecuencia	Responsable	Nombre de OT
40	Inspección visual de estado de pernos, fugas de grasa, medir vibraciones y temperatura.	2 semanas	Técnico Mecánico	2S RUTA RODILLOS RETORNO SEC
41	Asegurar calidad en montaje según procedimiento de cambio de rodamientos en polines de secadora. (revisar cambio de rodamiento actual)	N/A	Técnico Mecánico	N/A
42	Inspeccionar estado de retén y programar cambio de ser necesario con mecánico.	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
43	Inspeccionar estado de retén y programar cambio de ser necesario	2 semanas	Técnico Mecánico	2S RUTA RODILLOS RETORNO SEC
44	Asegurar calidad en montaje según procedimiento de cambio de rodamientos en polines de secadora. (revisar cambio de rodamiento actual)	N/A	Técnico Mecánico	N/A
45	Cambio de rodamiento según condición, establecer procedimiento, en donde se verifiquen tolerancias en el montaje del rodamiento.	N/A	Técnico Mecánico	N/A
47	Inspección visual de embrague, giro regular y temperatura, fugas de lubricante y estado de cadena. Aseguramiento de calidad, poner torque o estándar en CLR o HTE	2 semanas	Técnico Mecánico	2S RUTA RODILLOS RETORNO SEC
48	Ruta de lubricación cadenas, limpiar y relubricar.	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
49	Inspeccionar desalineamiento excesivo entre embragues.	2 semanas	Técnico Mecánico	2S RUTA RODILLOS RETORNO SEC
51	Cambio de cadena de embragues cada 2 años	2 años	Técnico Mecánico	104S CAMBIO CADENA EMBRAGUE SEC
55	Ruta de lubricación cadenas, limpiar y relubricar.	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
56	Asegurar stock de lubricante adecuado en bodega, coordinar con Jefe Mecánico de Maquina	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
57	Ruta de lubricación cadenas, limpiar y relubricar.	4 meses	Técnico Lubricador	8S RUTA LUB 11602 SECADORA
58	Realizar inspección de alineamiento de polines según recomendación del fabricante. Evaluar mejor tecnología para realizarlo (Topografía o sistema PARALING®)	5 años	Técnico Mecánico	260S REVISION DE ALINEAMIENTO DE POLINES
59	Enderezar rodillo en maestranza mediante puntos calientes	N/A	Maestranza	N/A

Anexo D: Plan maestro de mantenimiento del Área Mantención Mecánica de la etapa de secado.

Se exponen en rojo las semanas 3, 4 y 5, correspondientes a la Parada General de Planta y en naranjo las semanas 16, 29 y 43, en la cuales se realizarán las Paradas de Área. Por otro lado, las tareas con una frecuencia mayor a 1 año se planifican hasta el 2031.