UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2018-11

PROPUESTA DE MEJORA TECNOLÓGICA EN SISTEMA DE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE UNA PLANTA PAPELERA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CICLO CERRADO

LORENZI NEWMAN, SEBASTIÁN ALBERTO

https://hdl.handle.net/11673/49283

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO - CHILE

"PROPUESTA DE MEJORA TECNOLÓGICA EN SISTEMA DE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE UNA PLANTA PAPELERA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CICLO CERRADO"

SEBASTIÁN ALBERTO LORENZI NEWMAN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Luis Guzmán Bonet
Profesor Correferente: Julio Baeza Aguilera

Noviembre - 2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mis padres por todo su amor, comprensión y apoyo incondicional que me han brindado desde el primer día de mi vida, quienes, junto a mis abuelos y tíos, han sido pilares fundamentales en mi crecimiento y desarrollo como ser humano, permitiéndome ser el hombre que soy hoy en día.

Agradezco a Cami por toda su alegría que me contagia día a día y a Noe, por su apoyo, amor y comprensión durante todo este tiempo. Además, quiero hacer mención especial a mi abuelo Juan Carlos, agradecerle por todas sus experiencias transmitidas, la cuales sin duda contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

No puedo olvidar a todos los camaradas y amigos que conocí en esta etapa de mi vida, que sin duda hicieron de mi vida universitaria una experiencia inolvidable. Eléctricos Piscoleros, Partido del Siglo, Mecalientes y a Los más Trasher, gracias por tanto!

Por otra parte, agradezco al Grupo de Celulosa y Papel del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Complutense de Madrid y a los proveedores de las distintas tecnologías, por facilitarme información técnica que contribuyó de gran manera al desarrollo del presente proyecto.

Finalmente, agradezco al departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM y a sus docentes, por todo lo que me han brindado durante todos estos años. Agradezco al profesor Julio y especialmente al profesor Luis Guzmán, por su orientación, apoyo y conversaciones enriquecedoras a lo largo de todo este tiempo.

RESUMEN

El presente trabajo de título consiste en una propuesta de mejora tecnológica al sistema de aguas de una planta papelera, específicamente al proceso de producción de papeles y cartones de embalaje a partir de fibra recuperada. Esta, busca implementar las Mejores Técnicas Disponibles (*MTD*) de la industria de celulosa y papel, en conjunto con tecnologías de tratamiento de aguas, con el objetivo de cerrar los circuitos de aguas de la fábrica.

En base a la implementación del modelo, se consigue una reducción del 88% del consumo de agua fresca por tonelada producida, con respecto al consumo promedio del común de las plantas que fabrican papeles y cartones de embalaje. En cuanto a los efluentes liberados a los cuerpos de aguas receptores, se tiene que la propuesta consigue un proceso "0" riles, en condiciones normales de operación, facilitando un proceso productivo sustentable que entrega valor agregado a sus productos.

Para el de desarrollo de la propuesta, se utiliza una metodología de trabajo basada en proyectos de mejora continua. Así, se define el proyecto, se establecen sus necesidades y requerimientos técnicos y se utilizan herramientas de análisis, con el objetivo de facilitar el diseño del sistema de tratamiento y reutilización de aguas.

El diseño del sistema, comprende una separación efectiva de los diferentes circuitos de aguas, en base a su grado de contaminación, implementando tratamientos integrados al proceso productivo, los cuales se adecuan a las características físico-químicas del efluente a tratar y, satisfacen los requerimientos de calidad del proceso en particular, facilitando la operación bajo un ciclo cerrado de aguas.

Para el dimensionamiento del sistema de regeneración, se realiza un balance de aguas del proceso productivo, lo cual facilita el cálculo del sistema hidráulico y permite establecer *KPI* primario del proceso, relacionado al consumo de agua fresca por tonelada producida, cuantificando el desempeño del sistema de tratamiento y reutilización de aguas.

Finalmente, se realiza el estudio económico de la implementación de la propuesta de mejora tecnológica. Así, en base a un horizonte de evaluación de 20 años y una tasa descuento del 6,74%, calculada por el método *WACC* para un financiamiento del 60%, se obtiene que el *PAYBACK* del proyecto es de 4,8 años. Mediante un análisis de sensibilidad sobre *VAN*, basado en ciertos supuestos establecidos, se obtiene que el proyecto presenta una probabilidad del 97,5% de generar riquezas.

ABSTRACT

The research project consists of a proposal based on technological improvement to the waters system of a paper mill, specifically to the production of packaging papers and cartons from recovered fiber. This proposal seeks the implementation of Best Available Techniques (BAT) of the cellulose and paper industry, together with wastewater technology, aiming to close the factory's water circuits.

Based on the model implementation, 88% of fresh water consume can be reduced per produced ton, regards the average consumption of the common of the paper mills that produce packaging paper and cartons. As to the effluents released to the water reception bodies, the proposal achieves a "0" wastewater process, in normal operational conditions, facilitating a sustainable productive process, which provides benefit to its products.

For the development of the proposal, a work methodology based on continuous improvement projects is used. In this way, the project can be defined, its needs and technical requirements are established, and analysis tools are used with the objective of facilitating the design of the treatment system and reutilization of waters.

The design of the system includes an effective separation of the different water circuits based on their contamination degree, implementing treatments that are integrated to the productive process, which adapts to the effluent's physiochemical characteristics to be treated, and they meet the quality treatments in particular, facilitating the operation under a closed cycle of waters.

For the sizing of the regeneration system, a water balance of the productive process is done, which facilitates the hydraulic system estimate and allows establishing primary KPI process, related to the fresh water consumption per produced ton, quantifying the performance of the treatment system and waters reutilization.

Lastly, an economic study of the implementation of the technological improvement proposal is carried out. Thus, based on a projection of 20 years evaluation and a discount fee of 6,74%, all calculated by the $WACC$ method for a 60% financing, the *PAYBACK* of the project is 4,8 years. Through a *VAN* sensitivity analysis, based on certain established postulations, the project presents 97,5% of probability to generate wealth.

GLOSARIO

° **ISO:** Grado de blancura según ISO, International Organisation for Standardisation.

ADt: Tonelada métrica de pasta de papel seca. Esta se considera cuando el 95% de la masa total de pasta está libre de agua o dicho de otro modo tiene un 5% de humedad.

AOX: Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles según el método estándar para aguas residuales ISO 9562: 1998.

Al: Aluminio.

AR EDAF: Agua Regenerada por ElectroDAF.

AR UF: Agua Regenerada Ultra Filtración.

BAT: Best Available Techniques.

BEKP: Bleached Eucalyptus Kraft Pulp.

BREF: Documento Referencia de las Mejores Técnicas Disponibles.

BRM: Biorreactores de membrana.

BSKP: Bleached Softwood Kraft Pulp.

Ca: Calcio.

$CaCO_3$: Carbonato de calcio.

CAD: Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadoras).

CAPEX: Capital Expenditure (costos de inversión).

CIP: Clean In Place (Limpieza en el Lugar).

Cl: Cloro.

Cl_2: Dióxido de cloro.

CH_4: Metano.

CO_2: Dióxido de carbono.

CO_d: Carbono orgánico disuelto.

Cs(%): Consistencia de la pulpa papelera (en porcentaje).

CTMP: Pasta química-termomecánica.

Cu: Cobre.

D: Etapa de blanqueado con dióxido de cloro.

DAF: Dissolved Air Flotation (Flotación por Aire Disuelto"FAD").

DBO/DBO_5: Demanda biológica de oxígeno / demanda bilógica de oxígeno en un test de 5 días.

DQO: Demanda química de oxígeno.

ECF: Elemental chlorine free (libre de cloro elemental).

EDAF: Electroflotación por Aire Disuelto.

Fe: Hierro.

FRC: Fibra recuperada.

H_2O_2: Peróxido de hidrógeno.

HC: Pasta de alta consistencia (Cs(%) mayor al 30%).

H_2SO_3: Ácido sulfuroso.

HSO_3^-: Ion sulfito.

IPPC: Integrated Pollution Prevention and Control (Prevención y Control Integrados de la Contaminación).

Kj-N: Nitrógeno de Kjeldahl.

KPI: Key Performance Indicator.

LC: Pasta de baja consistencia (consistencia menor al 5%).

MC: Pasta de media consistencia (ente el 8-15%).

MF: Micro Filtración.

Mg: Magnesio.

mg/L: Unidad de concentración de materia (miligramos por Litro).

Mn: Manganeso.

MP: Materia prima.

MS: Materia seca.

MTD: Mejores Técnicas Disponibles.

Na_2S: Sulfuro de sodio.

NaOH: Hidróxido de sodio.

NF: Nano Filtración.

NO_x: Óxidos de nitrógeno.

N total: Nitrógeno total.

NTU: Unidad de medición de turbidez.

OI: Osmosis Inversa.

OPEX: Operating Expenses (costos operacionales).

P: Fósforo.

PAYBACK: Periodo de retorno de la inversión.

PO_4: Fosfato.

POA: Procesos de Oxidación Avanzada.

PPM: Partes Por Millón.

PTAS: Planta de Tratamiento de Aguas Servidas.

QFD: Quality Function Deployment (Despliegue de la Función de Calidad).

RC1: Regulador de Consistencia 1 (ubicado antes de la limpieza secundaria de baja consistencia).

RC2: Regulador de Consistencia 2 (ubicado antes del cajón de entrada de la máquina de papel).

RPM: Resolución Programada de Monitoreo.

SDT: Sólidos Disueltos Totales.

Si: Silicio.

SiO_2: Dióxido de silicio.

SO_4: Sulfato.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

ST: Sólidos Totales.

TCF: Total Chlorine Free (blanqueo totalmente libre de cloro).

TIR: Tasa Interna de Retorno.

TMP: Pasta termo mecánica.

UAA: Unidad de Análisis de Agua.

UF: Ultra filtración.

UKP: Unbleached Kraft Pulp.

VAN: Valor Actual Neto.

VC: Volumen Control.

VCA_{AF}: Volumen en Ciclo Abierto de consumo de Agua Fresca por tonelada métrica de pasta seca producida.

VMD_{AF}: Volumen Medido Diario de consumo de Agua Fresca por tonelada métrica de pasta seca producida.

VN_{AF}: Volumen Nominal de consumo de agua fresca por tonelada métrica de pasta seca producida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS ii

RESUMEN iii

ABSTRACT iv

GLOSARIO v

ÍNDICE DE CONTENIDOS ix

ÍNDICE DE TABLAS xv

ÍNDICE DE FIGURAS xx

INTRODUCCIÓN xxiv

OBJETIVOS xxvi

Objetivo general xxvi

Objetivos Específicos xxvi

PLAN DE TRABAJO xxvii

CAPÍTULO 1: 1

1. Estado del Arte 1

1.1 Antecedentes sobre la gestión integral enfocada en el medio ambiente junto con la disponibilidad y utilización del recurso hídrico en Chile 1

1.1.1. Importancia de hacer Gestión Ambiental en el sector industrial. 2

1.1.2. Disponibilidad y utilización de agua en Chile 5

1.2. Industrias de celulosa y papel 7

1.2.1. Clasificación de fuentes de celulosa y sus principales productos 7

1.2.2. Procesos involucrados en la fabricación de pasta de celulosa virgen y de blanqueado 10

1.2.3. Fabricación de Pasta Reciclada 16

1.2.4. Trasformación de Pasta en Productos Comerciales 20

1.2.5. Demanda del recurso hídrico por parte de la industria de celulosa y papel . 22

1.2.6. Caracterización de efluentes provenientes de la industria papelera 24

1.3. Aspectos legales sobre la política ambiental chilena y normativa de residuos líquidos industriales 31

1.3.1. Normas chilenas de emisión de residuos líquidos industriales 32

1.4. Sistemas y tecnologías de tratamiento de aguas 37

1.4.1. Introducción a las plantas de tratamiento de residuos industriales 38

1.4.2. Alternativas tecnológicas en tratamiento de aguas 40

1.5. Implementación de ciclo cerrado en las industrias de celulosa y papel 48

1.5.1. Técnicas para la optimización del uso del recurso hídrico 48

1.5.2. Casos en el mundo 49

CAPÍTULO 2: 52

2. Metodología de Trabajo 52

2.1. Definición del Proyecto 52

2.1.1. Enunciado de oportunidad 52

2.1.2. Caso de Negocio 53

2.1.3. Alcance del proyecto 53

2.1.4. Indicadores 54

2.2. Establecimiento y cuantificación de necesidades 55

2.2.1. Listado de atributos del sistema 55

2.2.2. Categorización de atributos 56

2.2.3. Jerarquización de atributos por métricas 59

2.2.4. Cuantificación de objetivos del sistema 60

2.3. Situación actual y requerimientos técnicos del proceso 62

2.3.1. SIPOC de la fabricación de papeles y cartones de embalaje 63

2.3.2. Caracterización de efluentes y niveles de consumo de agua fresca en de elaboración de papeles y cartones de embalaje 64

2.3.3. Especificaciones y requerimientos del proceso 65

2.4. Análisis de información 67

2.4.1. Árbol de funciones 67

2.4.2. Diagrama de relaciones (QFD) 69

2.4.3. Búsqueda de alternativas (Benchmarking) 74

2.4.4. Tormenta de ideas (Brainstorming) 76

2.4.5. Generación de alternativas de diseño 78

CAPÍTULO 3: 80

3. Diseño de la Propuesta de Mejora Tecnológica 80

3.1. Matriz de selección de alternativa tecnológica 81

3.2. Diseño del sistema de tratamiento y reutilización 83
3.2.1. Circuito de preparación pasta 84
3.2.2. Circuito de máquina de papel 87
3.2.3. Diseño del sistema de regeneración de aguas 91
3.3. Balance de aguas del sistema 93
3.4. Dimensionamiento del sistema hidráulico 97
3.4.1. Cálculos del sistema de transporte de aguas 97
3.4.2. Cálculos del sistema de almacenamiento de aguas 99
3.4.3. Instrumentos y unidades de medición y control 100
3.5. KPI'S del sistema de regeneración de aguas 101
CAPÍTULO 4: 104
4. Evaluación económica de la propuesta de mejora tecnológica 104
4.1. Cálculo de variables económicas del proyecto 104
4.1.1. Inversiones (Activos Fijos e Intangibles y Capital de Trabajo) 105
4.1.2. Costos operacionales 107
4.1.3. Beneficios financieros del proyecto 110
4.1.4. Escudos fiscales: Depreciación e intereses de financiamiento 112
4.2. Flujo de caja y cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad 115
4.2.1 Tasa de descuento y horizonte de evaluación 116
4.2.2. Indicadores de rentabilidad 117

4.3. Análisis estocástico de pronósticos y sensibilidad 120
4.3.1. Definición de distribuciones de probabilidad de supuestos económicos ... 120
4.3.2. Cálculo de pronósticos de rentabilidad 124
4.3.3. Análisis de sensibilidad 128

CAPÍTULO 5: 130
5. Conclusiones y recomendaciones 130
5.1. Conclusiones generales 130
5.2. Conclusiones específicas 131
5.3. Recomendaciones 138
REFERENCIAS 139
ANEXOS 147
Anexo I: Procedimientos de pastas químicas 147
Anexo II: Procesos y agentes de blanqueo 151
Anexo III: Aditivos de pasta y su finalidad 155
Anexo IV: Principales procesos que confieren propiedades y características a papeles 156
Anexo V: Política Ambiental Chilena 159
Anexo VI: Caracterización de riles crudos D.S. 90/2000 163
Anexo VII: Definición de los principales parámetros a controlar en los efluentes 164
Anexo VIII: Solicitud y seguimiento una RPM 166
Anexo IX: Tratamientos de efluentes 167
Anexo X: Balances de masa 175
Anexo XI: Cálculo del sistema de transporte de aguas 177

Anexo XII: Flujo de Caja 179

Anexo XIII: Plano de la propuesta de mejora 180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:Componentes químicos de las fuentes de fabricación de celulosa en (%). Fuente: Keefe & Teschke, 1995. 11

Tabla 2: Consumo de agua en fábricas de pasta mecánica según tipo de proceso. No se incluye el consumo de la fábrica de papel. Fuente: IPPC, 2006. 23

Tabla 3:Cargas específicas típicas como DBO_5, DQO y nutrientes en el agua de la fabricación de pasta mecánica de abeto noruego (Picea abies) antes del tratamiento externo. Fuente: BAT Report, 1997. 26

Tabla 4: Descargas de sustancias orgánicas de fábricas de pasta kraft antes del tratamiento externo. Las diferencias entre fibra larga y dura son bastante pequeñas, y las siguientes cifras para subprocesos no se monitorizan de forma continua, mientras que la cifra total está basada en los datos disponibles sobre medias anuales y en un muestreo continuo y proporcional al caudal. Fuente OSPAR, 1994..... 26

Tabla 5:Rango de nutrientes presentes en los efluentes de plantas de celulosa Kraft. Fuente OSPAR, 1994. 27

Tabla 6: Descarga de metales en efluentes de fábrica de pasta Kraft.. Fuente OSPAR, 1994. 27

Tabla 7: Emisiones medias al agua de fábricas a base de FRC después de tratamiento primario y antes de su descarga a una planta de tratamiento de aguas residuales. Fuente: BAT 1996. 28

Tabla 8: Emisiones medias de planta de FRC a cuerpos de agua luego de tratamiento primario y biológico. Fuente: BAT 1996. 29

Tabla 9: Descargas típicas de fábricas papeleras por producto antes de cualquier tratamiento y después del tratamiento biológico de aguas residuales. Fuente: IPPC, 2006. 31

Tabla 10: Ejemplo parámetros a monitorear en una RPM con sus respectivos límites máximos y tipos de muestras. Fuente SMA, 2016. 36

Tabla 11:Listado de atributos del sistemas elaborado a partir de un brainstorming. Fuente: elaboración propia. 55

Tabla 12:Categorización de atributos en objetivos, funciones y restricciones. Fuente: elaboración propia. 57

Tabla 13:Objetivos del sistema categorizados en base a las métricas secundarias. Fuente elaboración propia. 58

Tabla 14: Cuantificación según la importancia del atributo. Fuente: elaboración propia 60

Tabla 15: Cuantificación de atributos del sistema según importancia, considerando 1 como nada importante y 9 muy importante. Fuente: elaboración propia. 61

Tabla 16:Caracterización de efluentes provenientes de un equipo de flotación de aire disuelto (FAD) que tiene lugar en el proceso de elaboración de pasta para papeles y cartones de embalaje. Fuente: Ordóñez, 2011. 64

Tabla 17: Rango de consumo de agua fresca en el proceso de producción de papeles y cartones de embalaje. Fuente: elaboración propia en base a consumo especifico de agua por producto IPPC, 2006 y producción $750\ [ADt/día]$ 65

Tabla 18:Parámetros de calidad de agua fresca empleada para la producción de papeles y cartones a partir de fibra recuperada. Fuente: Ordóñez, 2011. 65

Tabla 19: Requerimientos técnicos del sistema de regeneración de aguas. Fuente: elaboración propia. 66

Tabla 20: Objetivos deseables del proyecto numerados. Fuente elaboración propia. 70

Tabla 21:Requerimientos técnicos numerados alfabéticamente. Fuente: elaboración propia. 71

Tabla 22: Requerimientos técnicos categorizados por prioridad según los resultados obtenidos del diagrama de relaciones QFD. Fuente: elaboración propia. 73

Tabla 23: : Información suministrada por proveedores de tecnologías de tratamiento de aguas. *Indica que las sustancias de lavado CIP pueden ser dañinas al sistema si la concentración de los agentes de limpieza es muy elevada. Todas las certificaciones son ISO. Fuente: elaboración propia. 75

Tabla 24: listado de proveedores de tecnologías. Fuente: elaboración propia en base a información suministrada por proveedores. 76

Tabla 25: Generación de alternativas tecnológicas para el diseño de la propuesta de mejora tecnológica. Fuente: elaboración propia. 78

Tabla 26: Matriz de selección de alternativa tecnológica mediante la evaluación de las necesidades y requerimientos del proyecto, con sus correspondientes pesos relativos. Fuente: elaboración propia. 81

Tabla 27: Parámetros de aguas regeneradas a la salida del equipo de Electroflotación. Fuente: elaboración propia en base a información proporcionada por proveedores de tecnologías. 85

Tabla 28: Características técnicas de la unidad de ultrafiltración suministrada por los proveedores de tecnologías. Fuente: elaboración propia. 89

Tabla 29: Balance de masa en volumen control de ecualizador de agua turbia. Fuente: elaboración propia. 94

Tabla 30: Balance de masa en volumen control de estanque de AR EDAF y manifold pulper. Fuente elaboración propia. 94

Tabla 31: Balance de masa en volumen control de ecualizador de aguas claras. Fuente: elaboración propia. 95

Tabla 32: Balance de masa en volumen control de estanque AR UF. Fuente: elaboración propia. 95

Tabla 33:Cálculo del dimensionamiento de tuberías y bombas del sistema hidráulico de la propuesta. Fuente: elaboración propia. 99

Tabla 34: Cálculo de dimensionamiento de los estanques de aguas del sistema hidráulico. Fuente elaboración propia. 100

Tabla 35: Inversión en activos del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Fuente: elaboración propia en base valores suministrados por proveedores de tecnologías... 106

Tabla 36: Costos operacionales del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, considerados en base a información suministrada por proveedores, documentación técnica IPPC, 2006 y el costo promedio del kWh para la ciudad de Santiago, Chile. 108

Tabla 37: Consumo energético de las tecnologías consideradas en la propuesta de mejora. Fuente: elaboración propia en base a información suministradas por proveedores y cálculo de potencias. 109

Tabla 38: Costos asociados al tratamiento de efluentes provenientes de una papelera con una producción diaria de 750[ADt] en base a un tratamiento primario físico-químico y uno secundario por lodos activados. Fuente: elaboración propia. 111

Tabla 39: Ahorro en los costos de tratamiento de agua fresca mediante osmosis inversa debido a la implementación de la propuesta de mejora tecnológica. Fuente: elaboración propia. 111

Tabla 40: Beneficios totales al implementar la propuesta de mejora tecnológica. Fuente: elaboración propia. 112

Tabla 41:Depreciación lineal de los equipos y componentes considerados por la propuesta de mejora, considerando un horizonte de evaluación de 20 años. Fuente elaboración propia en base a información de vida útil suministrada por proveedores. 113

Tabla 42:Cálculo de amortizaciones a cuota constante en base al financiamiento solicitado. Fuente: elaboración propia. 115

Tabla 43: Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia..... 117

Tabla 44:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 30 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia..... 118

Tabla 45:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 15 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia..... 118

Tabla 46:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y sin financiamiento externo. Fuente: elaboración propia. 119

Tabla 47:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y con un financiamiento externo del 100%. Fuente: elaboración propia. 119

Tabla 48: Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia..... 134

Tabla 49: Cuadro comparativo de beneficios versus inconvenientes en la implementación de ciclo cerrado en una planta papelera. Fuente: elaboración propia. 137

Tabla 50: Agentes involucrados en el proceso de blanqueo de pasta de celulosa. Fuente: Astrakianakis & Anderson, 1998. 152

Tabla 51:Aditivos comúnmente empleados en la fabricación de productos papeleros. Fuente: Astrakianakis & Anderson, 1998). 155

Tabla 52: Extracto de hoja de caracterización de riles crudos. Este contiene los parámetros considerados contaminantes y sus respectivos valores característicos de aguas servidas y carga media diaria de 100 habitantes. Fuente: SMA, 2015. 163

Tabla 53: Balances de masa del sistema de aguas. Fuente: elaboración propia. 175

Tabla 54: Balance de masa foso tela y filtro de discos. Fuente elaboración propia. 176

Tabla 55: Cálculo del sistema de bombeo de aguas. Fuente elaboración propia. 177

Tabla 56: Cálculo del sistema de bombeo de aguas (continuación). Fuente elaboración propia. 178

Tabla 57:Extracto del flujo de caja del proyecto. Fuente: elaboración propia 179

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: (a) Ave presencia efectos de la contaminación de aguas. (b) Peces mueren producto de la destrucción de su ecosistema debido a fuentes contaminantes. 3

Figura 2:Evolución de gases contaminantes ($CO2, CH4, NOx$) captados en la atmosfera a través del tiempo. Fuente: CSIRO 2012. 3

Figura 3:Gráfico de acumulación porcentual de extinción de especies a través del tiempo. Fuente: Accelerated modern human–induced species losses: Entering the sixth mass extinction. Science Advances (2015). 4

Figura 4:Disponibilidad y extracciones por usos consuntivos de agua por región en escala logarítmica. Fuente: Chile, diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos, Banco mundial. Elaborado a partir de datos de la DGA (Dirección General de Aguas), 2011. 5

Figura 5:Distribución de usos consuntivos de agua por sectores. Fuete: Elaboración propia según Ayala 2010. 6

Figura 6: Clasificación por fuentes y productos papeleros. Fuente: Elaboración propia. 10

Figura 7:Diagrama de flujo de la fase preparación madera (descortezado y astillado). Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014. 12

Figura 8:Capacidad de producción de pasta de celulosa por tipos a nivel mundial. Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 1995. 13

Figura 9:Digestor continuo de fábrica de celulosa junto a impregnadores de vapor, difusor y estanques de acumulación de pasta. Fuente: STI papeles. 15

Figura 10: Diagrama de flujo de la máquina de pasta papelera. Fuente: Celulosa Arauco 2014. 21

Figura 11: Valores máximos y mínimos de consumo de agua de alimentación por tonelada producida, para algunos productos fabricados a partir de fibra recuperada. Fuente: IPPC, 2006. 23

Figura 12: Estanque ecualizador de aguas contaminadas de industria papelera. Fuente: Celulosa Arauco, 2014. 25

Figura 13: Piscinas de decantado utilizadas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. 39

Figura 14: Efectos del proceso de coagulación y floculación. Suponiendo una partícula coloide de carga negativa, se añaden agentes coagulantes para desestabilizar las cargas y minimizar la repulsión entre las partículas. Luego el agente floculante permite crear puentes para aumentar el peso y tamaño de estas. 41

Figura 15: Celda de flotación empleada en el tratamiento de efluentes. 43

Figura 16: Filtración por membrana de flujo cruzado de tipo dentro-fuera. Fuente: Aquapurif. 44

Figura 17: SIPOC del proceso de producción de papeles y cartones a partir de fibra recuperada, con (FC) fibra corta y (FL) fibra larga. Fuente: elaboración propia. 63

Figura 18: Árbol de funciones del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Fuente: elaboración propia. 68

Figura 19: Diagrama de relaciones QFD , el cual establece y cuantifica las relaciones entre cada uno de los objetivos deseados del proyecto y las características de diseño de la propuesta de mejora tecnológica. 72

Figura 20: Brainstorming del sistema de regeneración de aguas, considerando los diferentes ámbitos de la propuesta de mejora. Fuente: elaboración propia. 77

Figura 21: Descripción gráfica del funcionamiento de un equipo de electroflotación para el tratamiento de aguas. Fuente: EnviroChemie GmbH. 85

Figura 22: Unidad de deshidratación: (a) Secador de tambor rotativo. (b) Filtro de prensa. Fuente: YIMIN y GEDAR respectivamente. 86

Figura 23: Diagrama de proceso de circuito de regeneración de aguas correspondiente a la sección de preparación pasta. Fuente: elaboración propia. 86

Figura 24: Descripción gráfica del funcionamiento de un filtro de discos. Fuente: WMT. . 88

Figura 25: Unidad de ultrafiltración para agua de acero inoxidable. Fuente: KRONES. 90

Figura 26: Diagrama de proceso del sistema de regeneración de aguas correspondiente al circuito de la máquina de papel. Fuente elaboración propia. 90

Figura 27: Fábrica con gestión a la vista de tuberías. Fuente: internet. 92

Figura 28:Gráfico circular de pérdidas del sistema de aguas del proceso de producción de papeles y cartones de embalaje. Fuente: elaboración propia. 96

Figura 29: Gráfico circular con el aporte porcentual de cada uno de los componentes considerados en la inversión del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Fuente elaboración propia. 106

Figura 30:Gráfico circular con el aporte porcentual de los costos variables considerados en el sistema. Fuente: elaboración propia. 108

Figura 31: Gráfico circular con el aporte porcentual del consumo de energía de los equipos considerados en el sistema de regeneración. Fuente: elaboración propia. 110

Figura 32:Distribución de probabilidad de la inversión. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 120

Figura 33:Distribución de probabilidad de los costos de operación. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 121

Figura 34:Distribución de probabilidad de los beneficios económicos. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 122

Figura 35: Distribución de probabilidad de la depreciación de los activos considerados por la propuesta de mejora. Fuente: elaboración propia en base al software Crytal Ball. 123

Figura 36: Distribución de probabilidad de la tasa de descuento en base a un financiamiento externo del 60%. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 124

Figura 37:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60%, determinando la certeza para que este sea positivo. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 125

Figura 38:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60%, determinando la certeza para que este sea mayor a 2.000.000 [USD]. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 126

Figura 39:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60% y límites establecidos para una certeza del 50%. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 127

Figura 40: Bandas de certeza de la distribución de probabilidad del Valor Actual Neto centrado en la mediana. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 127

Figura 41:Gráfico de sensibilidad en base a la contribución de la varianza del VAN. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 128

Figura 37:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60%, determinando la certeza para que este sea positivo. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 135

Figura 41:Gráfico de sensibilidad en base a la contribución de la varianza del VAN. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball. 136

Figura 44: Diagrama de flujo de la fase de digestión. Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014. 148

Figura 45:Diagrama de flujo de la fase de clasificación y lavado. Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014. 149

Figura 46:Diagrama de flujo de la fase de blanqueo. Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014. 151

Figura 47: Esquema de Institucionalidad Ambiental Chilena. Fuente Gestión Ambiental de RRNN, 2015. 160

Figura 48: Diagrama de flujo de una RPM. Fuente: SMA, 2015. 166

INTRODUCCIÓN

El mercado actual exige a todas las organizaciones encontrarse una constante búsqueda hacia la excelencia operacional, la cual consiste en contar con procesos productivos con valor agregado, globalmente eficientes y sustentables. Este hecho tiene como consecuencia un aumento de la rentabilidad de la organización, debido al aumento de la calidad en sus ciclos productivos, permitiéndoles obtener ventajas competitivas frentes a sus pares del mismo rubro. (Fundametos de Calidad UTFSM, 2015).

Bajo el contexto de excelencia operacional y mejora continua, la gestión de recursos juega un rol protagónico a nivel organizacional, sobre todo cuando estos son limitados y su utilización indiscriminada causa una fuerte repercusión en el entorno. Este, es el caso del agua, el cual es un recurso valioso por todo lo que esta significa, a nivel industrial, medio ambiental y social.

La importancia del consumo de agua para usos industriales es relativa y depende de las condiciones de cada región. A nivel mundial el consumo con fines industriales es el 25% del consumo total (Judd & Jefferson, 2005). Sin embargo, estos valores varían dependiendo del país. La mayoría de los procesos industriales, que desarrollan algún producto, utilizan grandes volúmenes de aguas, entre estas destacan; la industria minera, metalúrgica, de celulosa y papel, alimenticia, textil, química, entre otras. (Banco Mundial, 2011).

El alto consumo de este recurso, por parte de estas industrias, hace necesaria plantearse la idea de lograr una disminución del consumo global de agua por parte de las empresas y aprovechar oportunidades de mejora en cuanto a la utilización de este recurso en los procesos involucrados de la cadena de valor productiva. Así, una adecuada gestión y aprovechamiento de este recurso a nivel industrial, puede disminuir de manera considerable el KPI de consumo de agua fresca por tonelada producida, aumentando la sustentabilidad de la empresa, otorgándole valor agregado a sus productos.

Particularmente, según *Integrated Pollution Prevention and Control* (IPPC), la industria de celulosa y del papel, cuenta con efluentes (volúmenes líquidos provenientes del proceso industrial) con valores extremos de pH, elevado contenido de materia orgánica, sólidos en suspensión, compuestos orgánicos halogenados (AOX), debido a la utilización de compuestos de cloro en grandes cantidades por de blanqueo de las fibras de celulosa, alto contenido de fosforo, nitrógeno, sales, sustancia coloreadas, entre otros. (IPPC, 2006). Esto, hace necesaria la incorporación de una planta de tratamiento de aguas, con el fin de reducir la contaminación de efluentes, que estos operen con bajo la normativa ambiental vigente.

En este marco, la reutilización de aguas residuales provenientes del propio proceso productivo para fines industriales, pareciera ser una alternativa beneficiosa y comprometida con el entorno. El hecho de reutilizar este recurso permite, disminuir el consumo de agua, como también, el volumen de carga contaminante del efluente liberado al cuerpo de agua receptor, por tonelada de producto fabricada. (Area, Mastrantonio, & Veléz, 2012). El hecho

de producir operando bajo un “ciclo cerrado” (en cuanto al uso del recurso hídrico) hace necesaria la incorporación de sistemas de tratamiento de aguas que satisfagan los requerimientos de calidad de los equipos involucrados en la cadena de valor, de manera eficiente y al menor costo global posible, aumentando la sostenibilidad económica y ambiental del proceso productivo y de la organización.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de mejora al sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de una industria papelera, en base a tecnologías que permitan un proceso de ciclo cerrado, en cuanto a la reutilización del recurso hídrico en la cadena de valor productiva.

Objetivos Específicos

i. Describir los procesos involucrados en la industria de celulosa y papel.

ii. Analizar técnicamente las tecnologías empleadas en las plantas de tratamiento de RILES e identificar los protocolos sobre la gestión y normativa de estos residuos.

iii. Sugerir una mejora al sistema de tratamiento de residuos líquidos industriales provenientes de una planta papelera, a nivel de procesos, tecnologías y equipos involucrados, la cual permita la reutilización del recurso hídrico en el proceso productivo.

iv. Evaluar económicamente la implementación de la mejora al sistema de tratamiento de RILES que permita la reutilización de aguas, bajo ciertas consideraciones técnicas, físicas y económicas del proyecto.

v. Comparar las alternativas de tratamiento de ciclo abierto y ciclo cerrado, evaluado potenciales beneficios e inconvenientes de ambas tecnologías.

PLAN DE TRABAJO

En el capítulo 1 se expone información con respecto al estado del arte. Este comienza presentando los antecedentes sobre la gestión integral de recursos y la necesidad de contar con procesos sustentables dentro de las organizaciones. Esto, para lograr una menor repercusión ambiental, principalmente en aquellas empresas que explotan recursos naturales, como el agua, y donde su presencia tiene un fuerte impacto a nivel ecológico y social.

Se realiza una introducción sobre las industrias de celulosa y papel, presentando los principales procesos productivos que intervienen para la fabricación de los diferentes productos. Además, se establecen los valores promedios con respecto al consumo de agua fresca y generación de efluentes (identificando los parámetros más relevantes) para el desarrollo de los diferentes productos provenientes de estas industrias.

Se identifican los aspectos legales sobre la política ambiental chilena, las cuales consideran las normas de emisión de residuos líquidos industriales. Se exponen las normas aplicables, identificando valores límites de concentración de la carga contaminante que pueden presentar los efluentes, de manera que al momento se seleccionar el tratamiento de agua este opere bajo la normativa establecida.

Por otra parte, se realiza una introducción sobre las plantas de tratamiento de aguas residuales y se describen algunas de las tecnologías que estas emplean, con el objetivo de reducir la carga contaminante del efluente industrial antes de ser liberado al cuerpo receptor.

Finalmente, el presente capítulo culmina abordando la implementación de un ciclo cerrado de las aguas en las plantas de celulosa y papel, describiendo técnicas para la optimización del uso del recurso hídrico y casos en el mundo de industrias que poseen una operación bajo ciclo cerrado.

El capítulo 2, presenta la metodología de trabajo utilizada para el desarrollo de la propuesta de mejora tecnológica. En esta, se define el proyecto, estableciendo el enunciado de oportunidad, el caso de negocio, el alcance de la propuesta y su métrica de éxito, la cual busca disminuir al menos el 50% del consumo de agua fresca por tonelada producida.

Se establecen y cuantifican las necesidades que presenta el proyecto, categorizándolas con el objetivo de facilitar posteriormente el análisis de la propuesta. Además, se establecen las características técnicas para el diseño del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, en base a las condiciones operacionales que presenta una planta papelera tipo.

Posteriormente, para finalizar el capítulo, se realiza el análisis de la información presentada. Para el esto, se utilizan herramientas de diseño y mejora continua, entre las cuales destacan; árbol de funciones, diagrama de relaciones *QFD*, benchmarking, brainstorming, para culminar con la generación de alternativas de diseño.

En el capítulo 3, se presenta el diseño de la propuesta de mejora tecnológica. Comenzando con la selección de la alternativa que más se adecua a las necesidades anteriormente establecidas, a partir de una matriz de decisión. Posteriormente, en base a las herramientas utilizadas y con la alternativa tecnológica ya definida se diseña el sistema de tratamiento y reutilización de aguas integrado al proceso productivo.

Para determinar el volumen de aguas que circula en el sistema, y poder dimensionar este, se realiza un balance de masa del sistema productivo y regeneración de aguas, a partir de la consistencia de la pasta en cada etapa del proceso de producción. En base a esto, se determina el consumo de agua fresca por tonelada producida, permitiendo cuantificar su disminución, mediante la implementación de la propuesta de mejora. Posteriormente, se realiza el cálculo del sistema hidráulico, permitiendo dimensionar los diferentes equipos involucrados proceso de regeneración de aguas.

El capítulo culmina estableciendo el *KPI* primario del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, con el objetivo de cuantificar el desempeño que presenta en su operación.

En el capítulo 4, se analiza económicamente la propuesta. Este, comienza determinando las variables económicas que caracterizan al proyecto; inversión requerida, costos operacionales, beneficios económicos, depreciación e intereses, los cuales se utilizan para la construcción del flujo de caja. Este, facilita el cálculo de los indicadores económicos de rentabilidad del proyecto, en base a ciertos supuestos económicos, permitiendo determinar el periodo de recuperación de la inversión y otros indicadores de riqueza como el *VAN*.

Finalmente, el presente capitulo culmina realizando un análisis de sensibilidad de la propuesta. Esto, con el objetivo de considerar la variabilidad de las distintas variables de entrada y, evaluar, como esta afectan a la rentabilidad del proyecto.

El trabajo culmina con el capítulo 5, en donde se presentan las conclusiones de este, respondiendo el objetivo general y los objetivos específicos. Además, se incluyen algunas recomendaciones relacionadas con el estudio.

CAPÍTULO 1:

1. Estado del Arte

1.1 Antecedentes sobre la gestión integral enfocada en el medio ambiente junto con la disponibilidad y utilización del recurso hídrico en Chile

La gestión se relaciona con la realización de un conjunto de actividades que persiguen un objetivo en común. Así, la gestión integral a nivel organizacional, busca que todas las áreas de la empresa se coordinen para el correcto desarrollo de la actividad industrial, alineándose con la visión y misión de la organización (Karapetrovic & Willborn, 1998). Este hecho, en conjunto con procesos productivos eficientes y que entreguen valor agregado al producto o servicio ofrecido, permite a las organizaciones posicionarse en un lugar de excelencia a nivel operacional, obteniendo ventajas competitivas frente a sus pares del mismo rubro.

A diferencia de lo que ocurría en el pasado, hoy en día la gestión integral concibe a la empresa como un organismo completo e integrado en la sociedad, en donde cada acción tiene una repercusión cuantificable a considerar, tanto en la cadena de valor productiva, como también en el entorno social y ambiental. Así, desde las estrategias de marketing, pasando por los propios procesos productivos, hasta el departamento de recursos humanos, es necesario que compartan la filosofía y objetivos estratégicos de la organización, con el fin de aumentar la rentabilidad y sustentabilidad de esta.

Este cambio de paradigma a nivel empresarial y la búsqueda de la excelencia operacional, ha permitido a las organizaciones enfocarse en ámbitos que la gestión convencional no tomaba en cuenta, tal vez por considerarlos poco productivos o debido a que no reportaban beneficios inmediatos. Estos eran; la calidad de los procesos productivos, la calidad de productos y servicios entregados a los clientes, la gestión del medio ambiente y la prevención de riesgos laborales. Así, aunque la gestión integral engloba los múltiples procesos que se dan en la cadena de valor, la mayoría de los nuevos desafíos de la gestión integral se centran en las áreas mencionadas anteriormente, preguntándose a nivel empresarial ¿Estamos siendo eficientes en nuestros procesos? ¿Estamos satisfaciendo al consumidor? ¿Nuestra empresa es sostenible? ¿Nuestra empresa es un lugar seguro para trabajar? (Atehortúa, Bustamante, & Valencia, 2008).

Por otra parte, es necesario establecer, que toda actividad industrial requiere recursos para llevar a cabo la elaboración de algún producto deseado, convirtiendo a estos en un pilar fundamental de la cadena de valor productiva. Estos son variados, desde recursos energéticos, naturales, hasta insumos particulares antes elaborados. Cada recurso empleado tiene un costo

asociado, ya sea económico o de explotación de ambiental, en base a esto, se hace necesario contar con un proceso productivo integral, capaz de gestionar y utilizar estos de la mejor manera posible, cualquiera sea su naturaleza.

El agua y la energía son los recursos más empleados al momento de llevar a cabo la elaboración de algún producto deseado. Prácticamente todos los sectores industriales hacen uso de estos recursos, estando constantemente en la mira de proyectos de mejora, a nivel transversal, en los diversos sectores económicos; como industria minera, la de celulosa y papel, metalúrgica, alimenticia, agricultura, entre otros (Ayala, 2010).

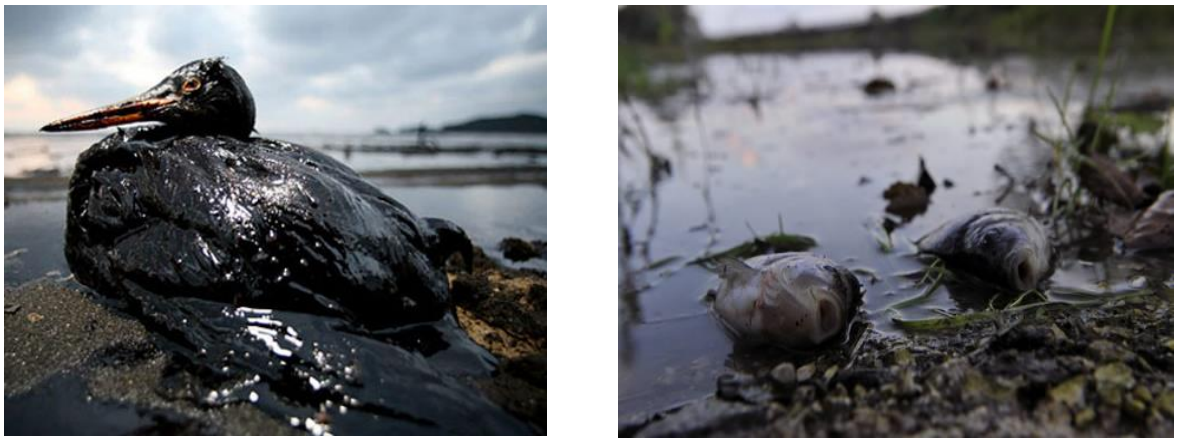
Lo anterior involucra una constante investigación, desarrollo e innovación tecnológica por parte de las industrias, para mejorar continuamente sus procesos, y con esto aumentar la eficiencia en cuanto a la utilización de los recursos y generación de residuos por unidad producida. En este mismo marco, la capacitación de personas respecto a diversas herramientas que busquen un desarrollo integral de los trabajadores, junto con el incentivo de buenas prácticas organizacionales, se vuelve fundamental para que las organizaciones se aproximan al grado de excelencia operacional, permitiéndoles ser más competitivas y sustentables.

1.1.1. Importancia de hacer Gestión Ambiental en el sector industrial.

Un desarrollo sostenible, busca equilibrar las necesidades económicas de las industrias con el ámbito social y medio ambiental. Se tiene que la gestión ambiental cumple un rol protagónico en este ámbito a nivel organizacional, debido a que es el área que impulsa un desarrollo económico solidario con el entorno. Esta, se puede definir como "un conjunto de acciones tendientes al uso, conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (RRNN) y del medio ambiente" (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

La búsqueda de la sustentabilidad de la industria con su entorno, al equilibrar las actividades antrópicas (provenientes del hombre) con el medio ambiente, como también, la prevención y control de las actividades que causen impactos negativos sobre este, es parte de la gestión ambiental. Así, esta rama de la gestión integral, fomenta el compromiso que deben adquirir las organizaciones con el medio ambiente al momento de desarrollar nuevos proyectos y llevar a cabo sus procesos productivos.

Lo anterior, se hace necesario, debido a que a la presencia de cualquier industria genera un gran impacto en el entorno social y/o ambiental, cualquiera sea su ubicación. Los aspectos positivos, como la generación de empleos y desarrollo de zonas rurales, se ven mermados por los impactos negativos sobre el medio ambiente. La generación de residuos por parte de las industrias, ya sean sólidos, líquidos y/o emisiones atmosféricas, aumenta los índices de contaminación de los cuerpos de aguas, tierras aledañas y entorno en general, afectando la flora y fauna de la región, como también en ocasiones, la salud de los habitantes de las comunidades cercanas.



(a) **(b)**

Figura 1: (a) Ave presencia efectos de la contaminación de aguas. (b) Peces mueren producto de la destrucción de su ecosistema debido a fuentes contaminantes.

La generación indiscriminada de residuos por parte del sector industrial, de cualquier tipo (sólidos, líquidos o gaseosos), no sólo afectan a zonas cercanas en particular, sino que son importantes agentes de contaminación a nivel mundial, motores del cambio climático y de extinción de especies, debido a la suma de sus efectos. Esto se puede ver reflejado en los siguientes gráficos.

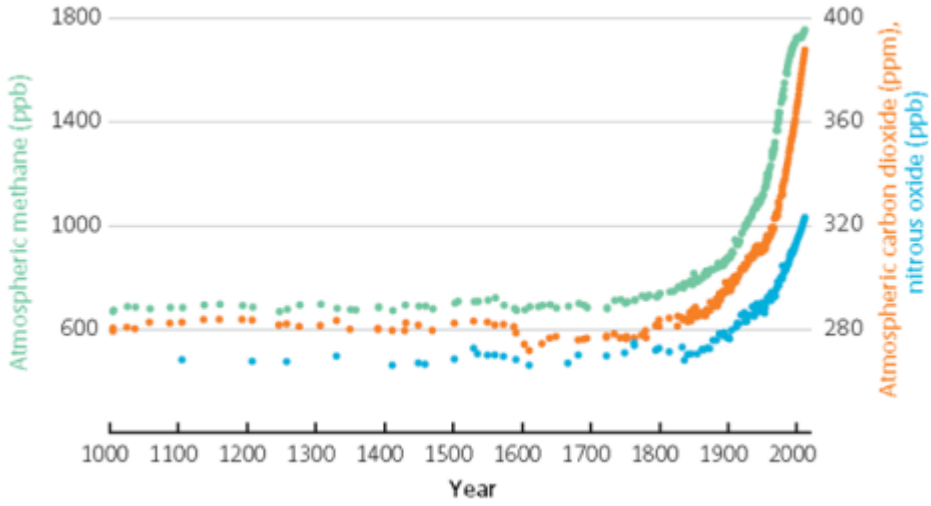


Figura 2:Evolución de gases contaminantes (CO_2, CH_4, NO_x) captados en la atmosfera a través del tiempo. Fuente: CSIRO 2012.

Producto de la revolución industrial, la cual comienza en la segunda mitad del siglo XVIII, se observa que a partir de 1850 la concentración de CO_2y CH_4 experimentan un fuerte aumento, creciente en el tiempo y de carácter exponencial. Los niveles de estos gases en la atmósfera rompieron con el patrón típico del Holoceno (era actual), llegando a alcanzar, en el siglo

actual, prácticamente las 400 [ppm] (partes por millón) en el caso del CO_2, un aumento de más de 150 puntos respecto a la situación previa a la revolución industrial. El aumento de CO_2 atmosférico tiene un impacto directo sobre la temperatura de la Tierra, debido a que es el principal agente de efecto invernadero. Así, este gas, impide que la radiación reflejada por la superficie terrestre fluya libremente al espacio exterior, actuando como un escudo, lo que trae como consecuencia el calentamiento de la atmosfera de la Tierra. Se cree que la temperatura global se ha incrementado alrededor de 1[℃] desde el año 1900, y que aumentará entre 1,5 y 3,5 [℃] para el año 2100. (Arasa, 2016).

La actividad humana no solo ha traído consecuencias climáticas, sino que también a nivel de extinción de especies. Esto se puede ver reflejado en la siguiente gráfica.

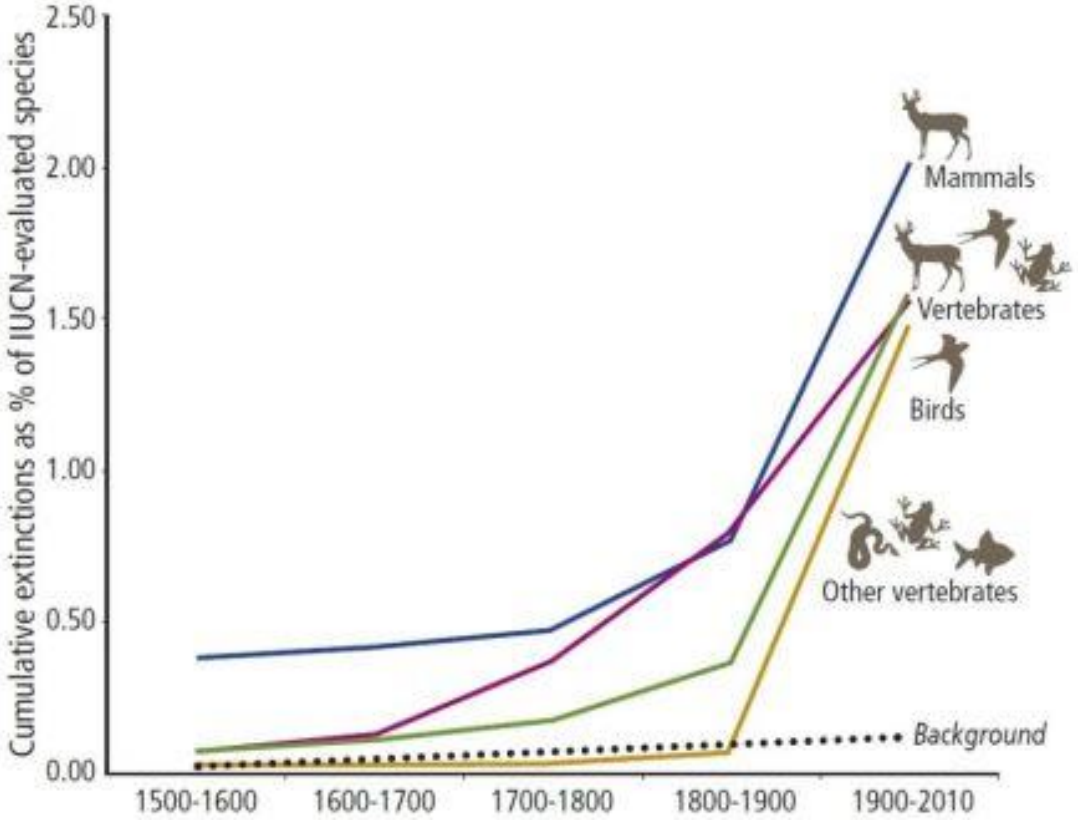


Figura 3:Gráfico de acumulación porcentual de extinción de especies a través del tiempo. Fuente: Accelerated modern human–induced species losses: Entering the sixth mass extinction. Science Advances (2015).

Desde el inicio de la revolución industrial, el ritmo de extinción de los vertebrados es 100 veces mayor que en el pasado. A este ritmo, se estima que para los siguientes siglos el número de especies que se extinguirán alcanzará el 75% de las existentes. La línea negra punteada de este gráfico muestra el ritmo de extinción pre-industrialización, mientras que las demás hacen referencia al porcentaje acumulado de especies extintas desde el año 1500. (Ceballos, y otros, 2015).

Lo anterior, pone de manifiesto la relevancia que tiene el hecho de hacer gestión ambiental por parte del sector industrial. De esta manera, se hace necesario que se impulsen y desarrollen proyectos que equilibren los aspectos económicos con los ambientales, y que, además, la gestión ambiental sea un eje del proyecto en particular, al igual que lo es el análisis técnico y económico, sobrepasando las exigencias del marco regulatorio o leyes aplicables y alineándose con la sustentabilidad.

1.1.2.Disponibilidad y utilización de agua en Chile

La Red Internacional de Organismos de Cuenca establece como uno de los objetivos básicos de la gestión del agua es reconocer que esta tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y, en consecuencia, debe considerarse como un bien económico. (Seguí Amórtegui, 2004). De esta manera, debe tratarse como un recurso limitado más dentro de la cadena de valor productiva, realizando acciones que busquen una adecuada gestión y utilización de este recurso.

Particularmente Chile, cuenta con 1.251 ríos, los que se emplazan en las 101 cuencas principales existentes en el país. Además, existen más de 15.000 lagos y lagunas de todo tipo de formas y tamaños que constituyen un invaluable activo medio ambiental y turístico. En general, los recursos hídricos presentes en ellos contienen agua de buena calidad y son importantes reguladores de los flujos en las cuencas. (Banco Mundial, 2011).

Dentro del contexto mundial, Chile podría ser calificado como un país privilegiado en materia de recursos hídricos, debido a su geografía. A continuación, se expone un gráfico de barras de la disponibilidad y las extracciones por usos consuntivos de agua por región, entendiendo por consuntivo aquella fracción de la demanda de agua que no se devuelve al medio hídrico después de su utilización. (Banco Mundial, 2011).

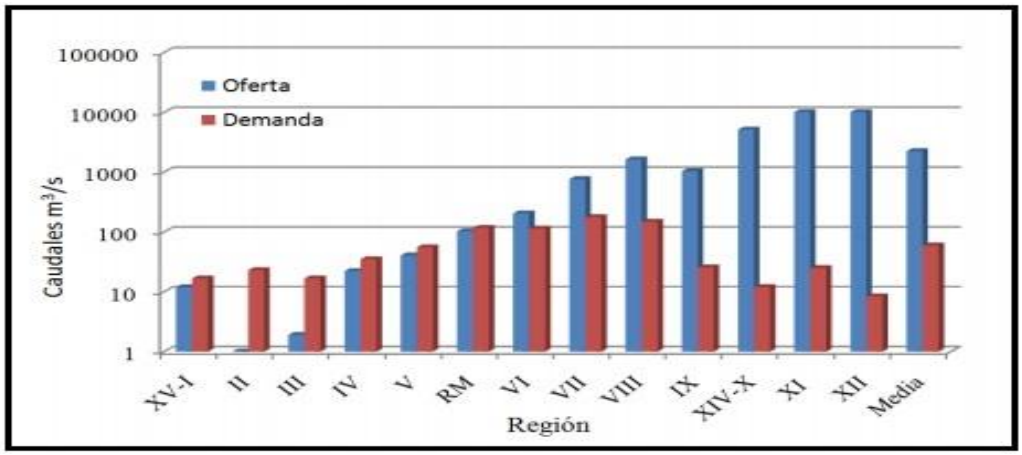


Figura 4:Disponibilidad y extracciones por usos consuntivos de agua por región en escala logarítmica. Fuente: Chile, diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos, Banco mundial. Elaborado a partir de datos de la DGA (Dirección General de Aguas), 2011.

A pesar de poseer un amplio recurso hídrico, es posible observar en el gráfico anterior, que la oferta de agua no es equitativa, presentando una distribución que concentra sus valores en el sur del país. Las diferencias son abismantes entre algunas regiones, por ejemplo, la II región posee una oferta 10.000 veces menor a la que cuenta la XII región. Al comparar la oferta con la demanda de agua, se tiene que sólo a partir de la VI región la oferta comienza a superar la demanda de este recurso. Así, desde la región metropolitana al norte, podría considerarse que hay un déficit de agua, que se va acrecentando hacia el norte del país.

El uso del agua en el país alcanza 4.710 $\left[m^3/_s\right]$, de los cuales el 89% corresponde a los usos no consuntivos y el 11% a usos consuntivos (Ayala, 2010). Dentro de los usos consuntivos se tiene que el riego, empleado por parte del sector agrícola, representa el 73% de las extracciones a nivel nacional, utilizado para regar 1,1 millones de hectáreas que se localizan casi completamente entre las regiones IV a X. El uso doméstico equivale a 6% de las extracciones y se utiliza para abastecer al 99,8% de la población urbana y rural concentrada. Los usos mineros e industriales representan el 9 y 12% de las extracciones totales respectivamente (Ayala, 2010).

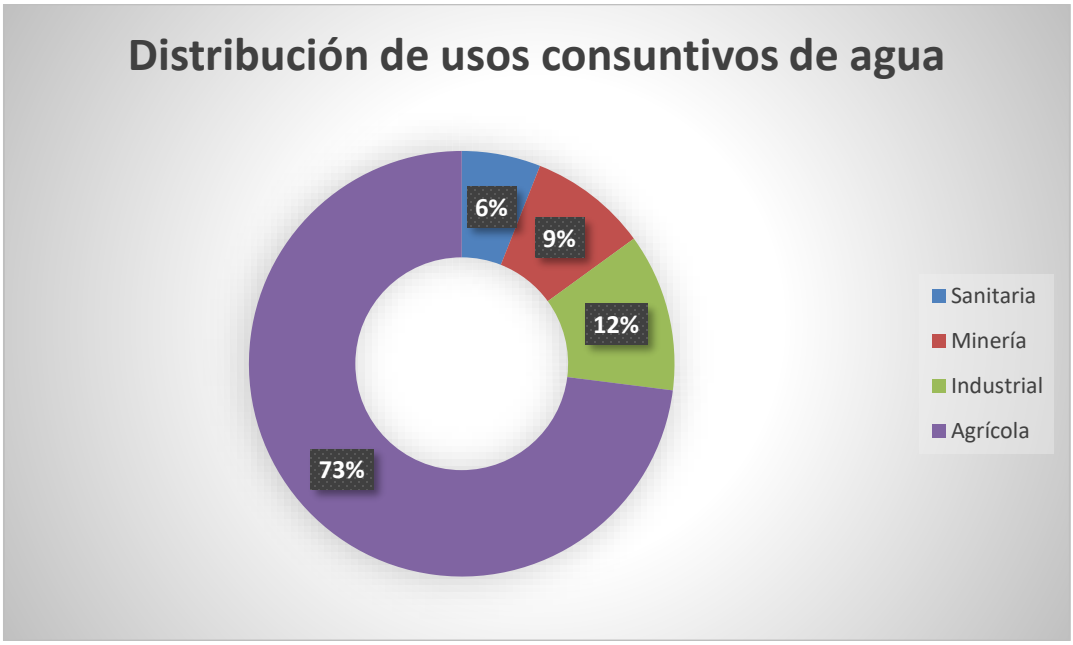


Figura 5:Distribución de usos consuntivos de agua por sectores. Fuete: Elaboración propia según Ayala 2010.

Como se puede observar, la demanda del recurso hídrico por parte de los diversos sectores económicos es importante. En base a esto, se hace necesario que las industrias cuenten con estrategias que estén alineadas con el medio ambiente, utilizando y conservando este recurso de manera sostenible en el tiempo. Debido a que tanto la explotación indiscriminada de cuerpos de agua, como la contaminación de estas fuentes hídricas, puede alterar la flora y fauna del lugar de manera catastrófica, acabando con especias propias de la zona, afectar comunidades a comunidades aledañas y, con esto, provocar un fuerte desequilibro en el entorno.

1.2. Industrias de celulosa y papel

La industria forestal, a partir de la plantación y extracción de árboles, suministra materia prima a dos principales cadenas productivas, la de celulosa y papel y la de productos madereros semielaborados y manufacturados. La asignación de madera a cada una de estas cadenas alternativas es en función de la demanda externa, las características de la materia prima disponible y las políticas de desarrollo y/o integración de las empresas productivas, con el fin de maximizar la rentabilidad del negocio. (Luraschi, 2007)

La celulosa es un producto intermedio extraído de las fibras vegetales de la madera, la cual es utilizada para producción de papeles, cartones y sus derivados. Esta, tiene gran parte de las características de un *commodity*, dentro de las cuales una de las más relevantes son las fuertes fluctuaciones de precios que experimenta en base a oferta y demanda. Por otro lado, en cuanto a la cadena de procesamiento de productos madereros se tienen; los semielaborados, como tableros y chapas, y los manufacturados, como lo son muebles, puertas, ventanas, embarcaciones menores, entre otros. (Luraschi, 2007).

Particularmente, la industria papelera tiene una gran importancia para las economías de Sudamérica debido a la gran disponibilidad de recursos forestales; Brasil y Chile son los mayores productores de celulosa del área. En Chile se procesan maderas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* con una producción anual de 2 millones de toneladas de celulosa, mientras que en Brasil se usa preferentemente madera de *E. grandis*, con una producción de alrededor de 6 millones de toneladas de pulpa al año. (Anónimo, 2005).

1.2.1. Clasificación de fuentes de celulosa y sus principales productos

Dentro de los productos semielaborados de menor procesamiento destaca la celulosa. Esta, desde un punto de vista más técnico, es una fibra vegetal que conforma las paredes de las células que dan origen a la madera. La estructura química de la celulosa está formada por uniones de moléculas de glucosa adheridas entre sí por la lignina, sustancia que refuerza las células y da resistencia a la madera. (Luraschi, 2007).

Las pastas celulósicas se pueden clasificar según la longitud de la fibra, encontrándose las siguientes: (Universidad Nacional de Cuyo, 2010).

- Fibra corta: Se refiere a las maderas duras como las frondosas: eucalipto, abedul, haya, roble, chopo, etc. y su longitud está comprendida entre los 0,75 [mm] y los 2 [mm] de largo, contiene además un porcentaje más elevado de celulosa. Entrega un mejor acabado superficial y es ideal para producir papeles de impresión y escritura.

- Fibra larga: Se refiere a las maderas blandas como las coníferas: pino, abeto, pinabeto. Se utiliza en la fabricación de papeles cuyo principal atributo es la resistencia, por ejemplo, para envases como los sacos de papel, las cajas de cartón y los estuches de cartulina.

- Fibras no madereras: Provienen de diferentes especies de arbustos. En los países industrializados se utilizan para producir papeles especiales. Sin embargo, en otros países son la principal materia prima para la fabricación de papel. Estas fibras presentan un gran potencial de desarrollo para sustituir a las fibras madereras. Las especies más utilizadas son: Algodón, Cáñamo, Lino y Bagazo de cereales.

- Fibras recuperadas: Las fibras presentes en el papel y cartón ya comercializado pueden volver a utilizarse para fabricar pasta papelera. A través del proceso de reciclado se pueden recuperar la mayoría de las fibras de celulosa que contiene el papel. No obstante, este proceso no se puede repetir de forma indefinida, ya que las fibras recuperadas pierden resistencia en el proceso, siendo necesario aportar según la resistencia del papel que se quiera fabricar, una proporción de fibras vírgenes al proceso de reciclado, ya sea procedentes de madera o de otras fibras vegetales.

Siguiendo con esto, se tiene que también se puede clasificar según el proceso de elaboración de la pulpa de celulosa, entre estas destacan principalmente la pasta mecánica y la pasta química, esto se abordará con más detalle en la siguiente sección. En términos breves, la celulosa mecánica se obtiene por medio de procesos de desastillados y trituración de la materia prima en presencia de agua con aditivos químicos. En ocasiones, las astillas se cuecen con vapor bajo presión previo a la formación de la pasta, lo que se conoce como un termo mecánico. Mientras que la celulosa química, tal como su nombre lo indica, involucra el uso de agentes reactivos y un proceso de cocción (digestión), a una determinada temperatura y presión, para llevar a cabo el proceso de extracción de la celulosa. (Luraschi, 2007).

Además de los métodos utilizados para la producción de celulosa (mecánico o químico), los procesos pueden o no considerar una etapa de blanqueo, el cual tiene como fin la extracción de lignina remante y tiene como consecuencia un producto blanco brillante. Así, considerando los procesos de fabricación, se exponen a continuación los principales productos elaborados por la industria de celulosa. (Luraschi, 2007).

- **Celulosa blanca de fibra larga**, denominada por la sigla BSKP (Bleached Softwood Kraft Pulp).
- **Celulosa blanca de fibra corta**, denominada por la sigla BEKP (Bleached Eucalyptus Kraft Pulp).
- **Celulosa no blanqueada de fibra larga**, denominada por la sigla UKP (Unbleached Kraft Pulp).
- **Celulosa termo mecánica** (denominada por la sigla TMP), que normalmente no es blanqueada pero que puede ser blanqueada para dar origen a la celulosa BTMP (Bleached Thermo Mecanical Pulp). En caso de que este proceso involucre procesos químicos se le denomina celulosa CTMP (Chemical Thermo Mecanical Pulp).

A continuación, se presenta un listado de productos de mayor grado de procesamiento en base a celulosa. Cabe mencionar que el tipo de producto dependerá del proceso de fabricación de celulosa, como también del estado de la fibra (virgen o reutilizada). (Luraschi, 2007).

- **Papeles de escritura:** Están formados por una estructura obtenida en base a fibras vegetales de celulosa, las cuales se entrecruzan formando una hoja resistente y flexible. Existen diferentes tipos de papel en cuanto a rigidez y blancura, según hayan sido elaborados con pulpa de celulosa mecánica, química o a partir de fibra recuperada. De la celulosa mecánica se obtienen los papeles relativamente frágiles, llamados de un solo uso, entre estos destacan los papeles de prensa (periódicos), de seda y de otros de menor calidad. De la celulosa química, obtenida del proceso Kraft, se tienen papales de usos múltiples como; papel de escritorio de alta calidad, libros u otros usos.

- **Papeles de alto contenido de celulosa:** La pasta utilizada en estos papeles se obtiene mediante procesos químicos al sulfito. Entre estos papeles destacan, los de fotografía, TNT, adhesivos, plásticos, papeles utilizados en envoltorios de helados y dulces.

- **Cartones:** es un papel de mayor grosor y coloración café. Por lo general son producidos por pastas mecano-químicas, excepcionales por su consistencia e ideales para la estructura necesaria para recipientes de cartón ondulado. El cartón se puede fabricar en hojas formadas por una o por varias capas, con núcleo o sin él, utilizando tanto fibras vírgenes o recicladas.

- **Papeles higiénicos o de uso doméstico:** es un papel suave y absorbente para uso doméstico y sanitario, que se caracteriza por ser de bajo peso y crepado. Es decir, con toda su superficie cubierta de micro arrugas, las que le confieren elasticidad, absorción y suavidad. Estos pueden ser fabricados a partir de fibra virgen, reciclada o mezclarse, diferenciándose en su precio y calidad.

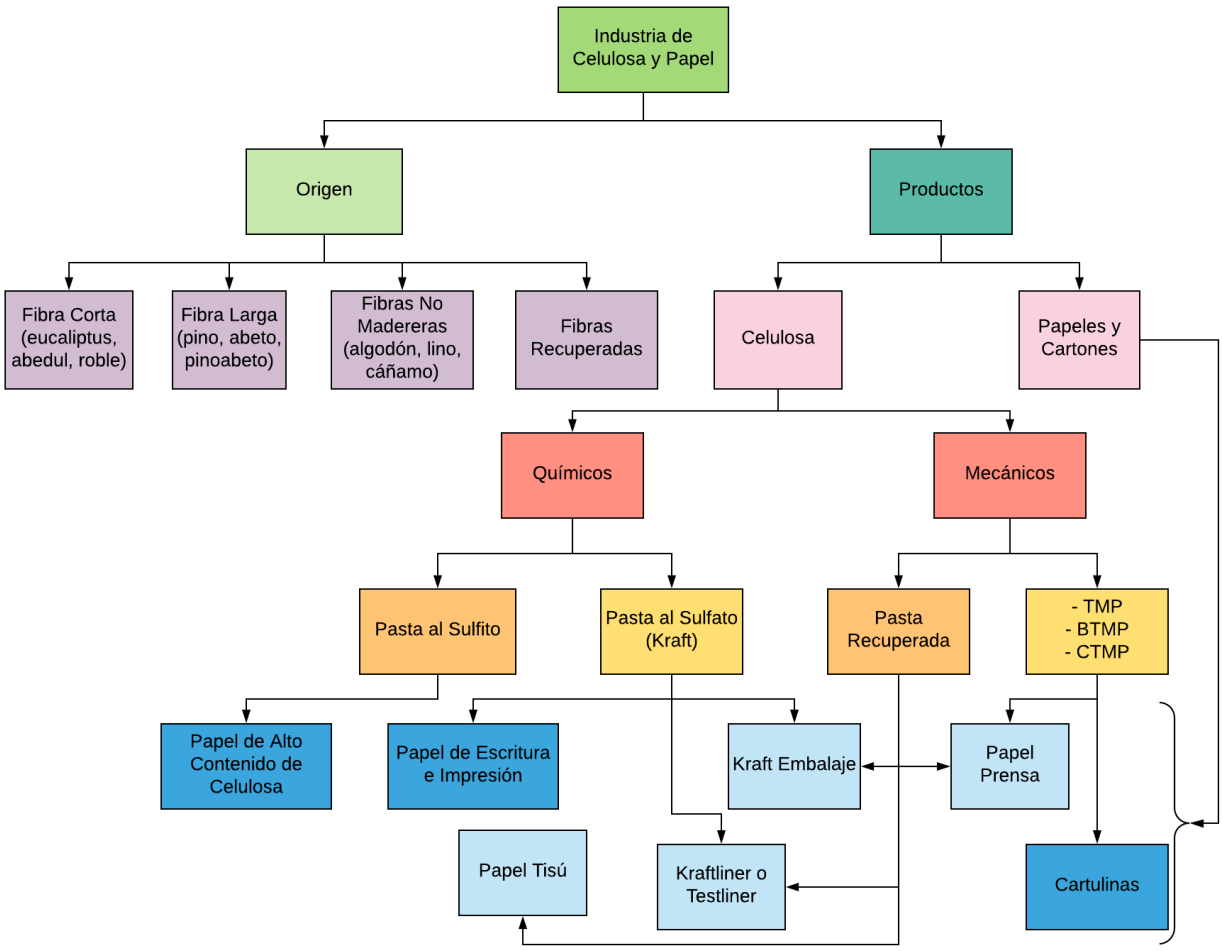


Figura 6: Clasificación por fuentes y productos papeleros. Fuente: Elaboración propia.

1.2.2.Procesos involucrados en la fabricación de pasta de celulosa virgen y de blanqueado

La madera está conformada por tres componentes principales, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Para liberar las fibras de celulosa de la matriz de la madera, es necesario remover la lignina, compuesto que mantiene unidas a dichas fibras y le entrega rigidez a la madera. (UPM, 2016). A continuación, se expone una tabla con los componentes químicos principales y sus respectivas fuentes para la fabricación de pasta de celulosa.

Tabla 1:Componentes químicos de las fuentes de fabricación de celulosa en (%). Fuente: Keefe & Teschke, 1995.

	Maderas blandas	Maderas duras	Paja	Bambú	Algodón
Carbohidratos					
α-celulosa	38–46	38–49	28–42	26–43	80–85
Hemicelulosa	23–31	20–40	23–38	15–26	n.d.
Lignina	22–34	16–30	12–21	20–32	n.d.
Extraíbles	1–5	2–8	1–2	0.2–5	n.d.
Minerales y otros compuestos inorgánicos	0,1–7	0,1–11	3–20	1–10	0,8–2

n.d. = sin datos disponibles.

A continuación, se describen los diversos procesos involucrados en la fabricación de pasta de celulosa en base a los distintos métodos existentes, junto con su respectivo proceso de blanqueado.

1.2.2.1. Proceso de Preparación Madera

La madera llega a la fábrica de pasta en forma de troncos en bruto (denominados en ocasiones como rollizos) o como astillas de una planta de cortado de tablones. En ocasiones, la propia fábrica dispone de serrerías que producen tanto tablones comercializables, como también materia prima para la fábrica de pulpa. En la zona de preparación de la madera se llevan a cabo varias tareas básicas: recepción y cubicaje de la madera al ritmo requerido por la factoría; preparación de la madera para que responda a las especificaciones de aprovisionamiento por especies, limpieza y dimensiones de la fábrica; y recogida de todos los materiales desechados en las operaciones anteriores y envío para su eliminación final. La madera se transforma en astillas o troncos adecuados para la transformación en pasta mediante una serie de pasos, entre los que figuran el descortezado, el aserrado, el astillado y el tamizado. (Taschke, y otros, 1998).

Un equipo comúnmente utilizado para descortezar los troncos es un tambor rotatorio, este mediante la fricción de madera con madera y con el mismo tambor permite retirar la corteza de los rollizos. A su vez, uno de los equipos más empleados para la generación de astillas, consiste en un disco giratorio con cuchillas en su interior. Este equipo es alimentado por un motor eléctrico de alta potencia y permite lograr un tamaño de astillas que se adecua al requerimiento por el proceso. (Celulosa Arauco, 2014).

Previo a la siguiente fase del proceso, las astillas son clasificadas, enviando al silo de astillas sólo aquella fracción que se encuentra entre 22-24 [mm] de largo y con un espesor entre 2-4 [mm], para posteriormente someterlas al proceso de producción de pasta. Las astillas de mayor tamaño

son nuevamente astilladas, mientras que las de menor tamaño son enviadas al silo de corteza, para que, junto con estas sean utilizadas como combustible en caldera generadora de vapor. (Celulosa Arauco, 2014).

A continuación, se expone un diagrama de flujo que expone los procesos de la fase preparación madera, el cual fue extraído de documentos bibliográficos de celulosa Arauco.

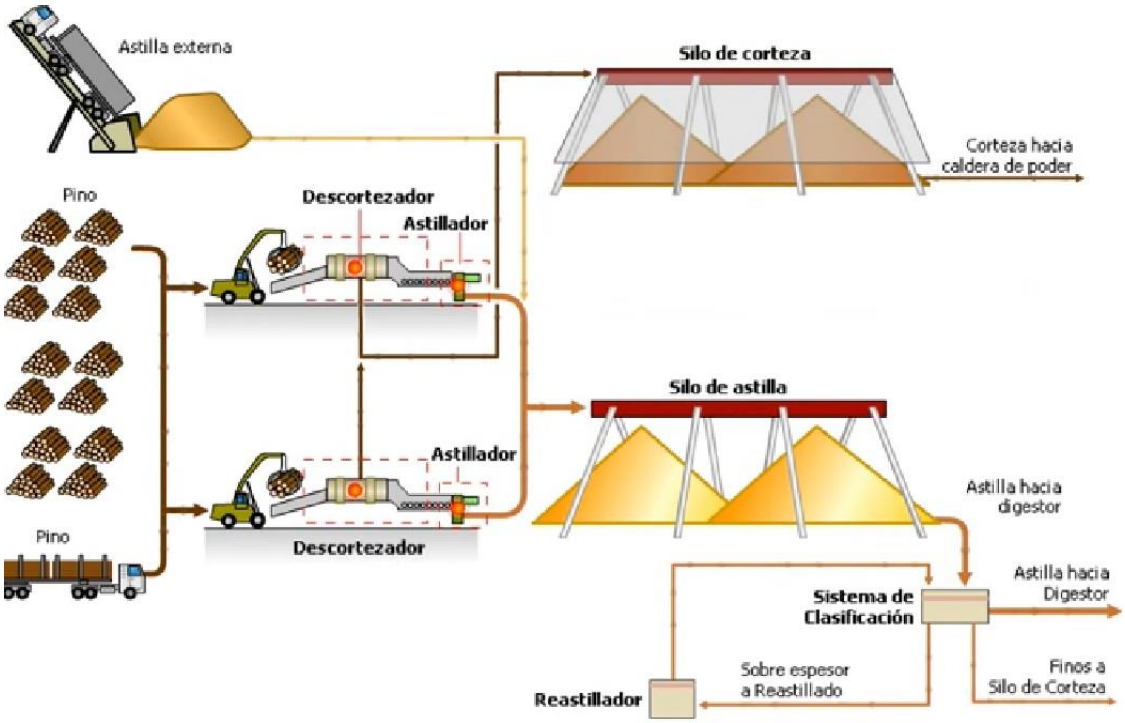


Figura 7:Diagrama de flujo de la fase preparación madera (descortezado y astillado). Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014.

1.2.2.2. Elaboración de Pasta de Celulosa Virgen

La elaboración de pasta de celulosa busca romper los enlaces dentro de la estructura de la madera, ya sea mecánica o químicamente. Esto se realiza con el fin de separar la celulosa del resto de los componentes de la madera, donde el proceso de extracción, definirá el tipo de pasta con sus respectivas cualidades. Cabe mencionar que las pastas químicas se pueden producir tanto en un medio alcalino, siendo sulfato o proceso Kraft el más utilizado a nivel mundial, como también en un medio ácido, como el sulfito. (Taschke, y otros, 1998). A continuación, se expone un gráfico que muestra la capacidad de producción mundial de pasta de celulosa por tipos.

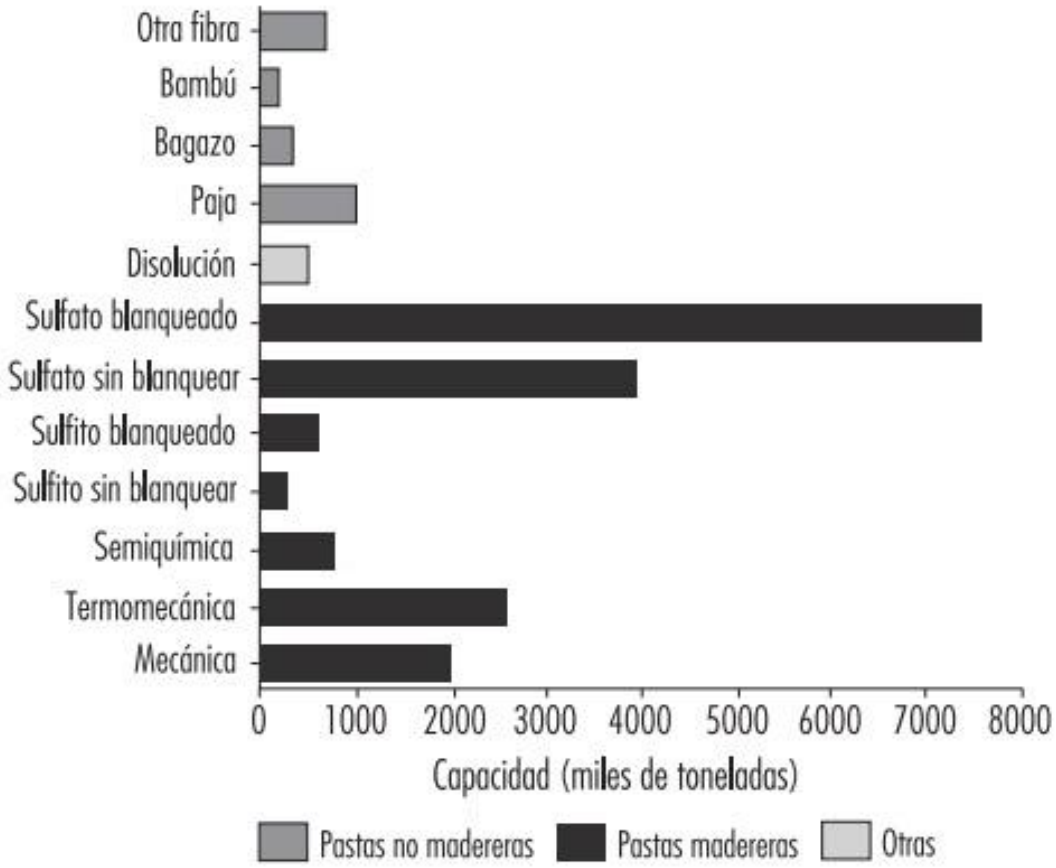


Figura 8:Capacidad de producción de pasta de celulosa por tipos a nivel mundial. Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 1995.

Como se puede observar, en base al gráfico anterior, la mayor parte de la pasta de celulosa producida en el mundo se obtiene por el procedimiento al sulfato, seguida por los métodos mecánicos (semi químico, termo mecánico y mecánico) y luego por el procedimiento al sulfito. Los procesos de elaboración de la pasta difieren en el rendimiento y la calidad del producto, debido a los métodos y productos químicos utilizados, como también en la proporción que estos últimos pueden recuperarse para su reutilización. (Taschke, y otros, 1998).

A continuación, se describen en términos generales los diferentes tipos de fabricación de pasta de celulosa a partir de madera.

- **Pasta Mecánica**

El proceso mecánico consiste en triturar las astillas en presencia de agua, para generar una pulpa. La trituración de la madera se realiza contra una piedra o entre placas metálicas, para que se separen las fibras. La acción de las máquinas rompe estas fibras de celulosa, por lo que la pasta resultante es más débil que la separada químicamente. La lignina que une la celulosa a la hemicelulosa no se disuelve, simplemente se ablanda, permitiendo que las fibras se asienten fuera

de la estructura de la madera. El rendimiento (proporción de la madera inicial en la pasta) suele ser superior al 85 %. Algunos métodos mecánicos de formación de pasta utilizan también productos químicos (por ejemplo, las pastas quimio mecánicas); sus rendimientos son más bajos porque eliminan más cantidad de materiales no celulósicos. (Taschke, y otros, 1998)

Actualmente, en la fabricación de pasta mecánica, se emplean equipos denominados refinadoras. Aquí, se desmenuzan las astillas en trozos más pequeños, al presionarlos a través de rejas y ranuras cada vez más estrechas mediante un disco giratorio impulsado por un motor eléctrico. Las astillas se introducen por el centro del disco a través de las tuberías de gran diámetro, saliendo pulpa por otras más estrechas. (Taschke, y otros, 1998)

Una variante de esta técnica es la elaboración de pasta termo mecánica (TMP, por sus siglas en inglés), en la que las astillas se cuecen al vapor antes y durante el refino, normalmente bajo presión. Uno de los primeros métodos de producción de pasta mecano-química implica la pre cocción de los troncos con vapor antes de hervirlos en licores de pasta química, y su paso posterior a través de molinos con muelas de piedra para obtener pastas de "madera quimio-molida". El tratamiento moderno de pasta mecánico-química emplea discos refinadores con tratamiento químico (p. ej., bisulfato sódico, hidróxido sódico), durante o después del refinado. Las pastas así producidas se denominan mecano-químicas o termo mecano-químicas (CTMP, por sus siglas en inglés), según el refino se haya producido a presión atmosférica o a alta presión. (Taschke, y otros, 1998).

Es importante mencionar que por lo general para este proceso se utiliza una madera de fibra larga, como la del pino. Si bien, este proceso permite la extracción de celulosa de la matriz, la remoción de la lignina no es muy efectiva. Como consecuencia de esto, el producto elaborado a partir de esta pulpa es de menor calidad, y por lo general, es utilizado para la fabricación de productos que no requieren una gran durabilidad, como lo es en el caso del papel para periódico, entre otros tipos de productos. (Luraschi, 2007).

- **Pasta química**

La pasta química se produce disolviendo químicamente la lignina dispuesta entre las fibras de la madera, con lo cual se separan éstas sin dañarse de forma sustancial. Como en estos procesos se eliminan muchos de los componentes no fibrosos de la madera, los rendimientos son normalmente del 40 al 55 % en cuanto a nivel másico de la materia prima entrante. (Taschke, y otros, 1998).

El procedimiento implica la cocción de las astillas y los reactivos en solución acuosa en un reactor que puede funcionar por lotes o de forma continua. En la cocción discontinua, el digestor se carga de astillas a través de una abertura superior, se añaden los digestores químicos, y el contenido se cuece a temperatura y presión elevadas. Una vez se terminada la cocción, se libera la presión "soplando" fuera del digestor la pasta deslignificada hacia un tanque de contención. Entonces se repite la secuencia. En la digestión continua, las astillas pre-cocidas con vapor se introducen en el digestor a un ritmo constante. Las astillas y los reactivos se mezclan en la zona de impregnación, en la parte superior del digestor, y entonces se van desplazando desde la zona

superior de cocción a la inferior y a la zona de lavado, antes de soplarlas al tanque. (Taschke, y otros, 1998).

Existen dos tipos de procedimientos en la elaboración de pasta química, al sulfato o *Kraft* y al sulfito. El primero consiste en un proceso de cocción de las astillas en una solución acuosa, la cual contiene agua y licor blanco, compuesto por hidróxido de sodio ($NaOH$) y sulfuro de sodio (Na_2S). (Celulosa Arauco, 2014). Mientras que el segundo, la elaboración de la pasta de celulosa se realiza con licor de cocción de ácido sulfuroso (H_2SO_3) e ion bisulfito (HSO_3^-), los cuales se preparan por lo general en el mismo lugar. (Taschke, y otros, 1998). Ambos procedimientos se detallan en el Anexo 1: Procedimientos de pastas químicas.

Figura 9:Digestor continuo de fábrica de celulosa junto a impregnadores de vapor, difusor y estanques de acumulación de pasta. Fuente: STI papeles.

Actualmente, en muchas de las operaciones de elaboración de pasta de celulosa, que tienen lugar en los digestores, los químicos aquí empleados se recuperan, haciendo más competitivo el proceso desde un punto de vista económico. De este modo, a partir del licor de cocción, extraído del proceso de digestión, pueden reconstituirse los reactantes empleados mediante procesos químicos desarrollados en la plata recuperadora, lo que trae un beneficio económico y ambiental debido al menor grado de consumo global y eliminación de productos contaminantes. Además, a partir de este proceso es posible generar energía, quemando los componentes orgánicos de la madera disueltos en el licor extraído, donde la electricidad y el vapor resultantes suministran parte, si no la totalidad, de las necesidades energéticas de la fábrica. (UPM, 2016).

1.2.2.3. Proceso de Blanqueado

El blanqueo es un proceso compuesto de varias etapas mediante el cual se refina y aclara la pasta en bruto mediante la adición de productos químicos que actúan como reactantes, junto con la pulpa, permitiendo obtener un producto con las características deseadas. El objetivo es disolver (en caso de la pasta química) o modificar (en caso de la pasta mecánica) la lignina parda residual en la pulpa que no se eliminó durante los procesos de elaboración de la pasta, manteniendo la integridad de las fibras, y decolorar la pasta, de manera de lograr una pulpa con blancura comercial. Cabe mencionar que una fábrica que produce pasta por encargo, varía el orden, la concentración y el tiempo de reacción de los agentes blanqueantes. (Taschke, y otros, 1998).

Cada etapa del blanqueo se define por su agente blanqueante, el pH (acidez), la temperatura y la duración de este proceso. Después de cada una de ellas, la pasta se debe lavar con agentes cáusticos para eliminar los agentes blanqueadores y disolver la lignina antes de pasar a la siguiente. Finalizada la última etapa, la pasta se bombea a través de series de tamices y limpiadores para eliminar cualquier contaminante, como basura o plásticos. Entonces se concentra y transporta al almacenamiento. (Taschke, y otros, 1998).

A causa de los condicionantes ambientales referentes a las sustancias organocloradas, las cuales presentan un alto nivel de toxicidad y se encuentran de manera importante en los vertidos de las fábricas de pasta de papel, se han adoptado alternativas que buscan disminuir el impacto de este proceso sobre el medio ambiente. Entre las alternativas se encuentran básicamente dos familias de tecnologías la *ECF (Elemental Chlorine Free)* y la *TCF (Total Chlorine Free)*. La *ECF* utiliza dióxido de cloro como agente blanqueador, mientras que la *TCF* no utiliza cloro en ninguna de sus formas, puesto que se basa en compuestos de oxígeno como agente blanqueador. (Luraschi, 2007).

Para mayor información sobre el proceso de blanqueo y los diversos agentes empleados en este visitar el Anexo II: Procesos y agentes de blanqueo.

1.2.3.Fabricación de Pasta Reciclada

La fibra recuperada como materia prima para la preparación de pasta ha aumentado en el transcurso de las últimas décadas, hasta el punto de que algunas papeleras dependen casi completamente del papel de desecho. En algunos países, este último se separa del resto de los residuos domésticos, en origen, antes de su recogida. En otros se realiza una separación por clases (por ejemplo, cartón ondulado, papel prensa, papel de calidad, papel mezclado) en plantas especiales de reciclaje. (Taschke, y otros, 1998).

Como se mencionó anteriormente, a través del proceso de reciclado se pueden recuperar la mayoría de las fibras de celulosa que contiene el papel. No obstante, este proceso no se puede

repetir de forma indefinida, ya que las fibras recuperadas pierden resistencia en el proceso, siendo necesario aportar según la resistencia del papel que se quiera fabricar, una proporción de fibras vírgenes al proceso de reciclado, ya sea procedentes de madera o de otras fibras vegetales. (Universidad Nacional de Cuyo, 2010).

El proceso del papel recuperado varía según la calidad del papel a producir, como por ejemplo papel de embalaje, papel prensa o papel tisú, así como el tipo de composición de fabricación utilizado. Generalmente, los procesos de fibras recicladas (FRC) pueden dividirse en dos categorías principales: (IPPC, 2006).

- Procesos con limpieza exclusivamente mecánica, es decir, sin productos que incluyan destintado, como testliner, papel ondulado, cartón con o sin estucar.

- Procesos con limpieza mecánica y destintado, que comprenden productos como papel prensa, papel tisú, papel para impresión y copia, papeles para revista super calandrado (SC) o papel estucado ligero (LWC), cartón con o sin estucar o DIP (pasta destintada) comercial.

En las fábricas de papel recuperado se aplican muchos sistemas distintos en el proceso. Sin embargo, todos se basan en pasos de proceso similares que pueden combinarse de forma diversa para cumplir su tarea específica. Todos los sistemas de proceso tienen como objetivo el desfibrado, desagregado y eliminación de impurezas, es decir, la separación eficaz del material fibroso y las impurezas y contaminantes. Las plantas de fibras recicladas se componen de "bloques básicos" similares, diseñados para la tarea específica, los cuales se presentan a continuación. (IPPC, 2006).

1.2.3.1. Almacenaje del papel recuperado

El papel recuperado se entrega normalmente a la fábrica de papel en forma de balas o fardos que se mantienen juntos mediante alambres o flejes metálicos. Las balas o fardos se abren cortando los alambres o los flejes, que se recogen y se venden como residuos de metal. En algunas fábricas, el papel recuperado también se suministra como material suelto en grandes contenedores o mediante descarga a granel. El papel recuperado se almacena en los almacenes de papel recuperado, integrados en la fábrica de papel. (IPPC, 2006).

1.2.3.2. Desintegrado de papel recuperado seco

El papel reciclado se puede transformar en pasta en un proceso que utiliza agua caliente y, a veces $NaOH$ y agentes de destintado, dependiendo del producto a elaborar (Taschke, y otros, 1998). Este tiene lugar en un equipo de agitación denominado “Pulper”, el cual tiene como propósito desintegrar la materia prima, esto con el fin de separar las fibras de papel de los otros componentes. Hay tres tipos de pulpers, catalogados en base a la consistencia de la pasta (porcentaje de masa sólida sobre la masa agua), los de baja consistencia (LC: $4 - 6\%$), los de alta consistencia (HC: aprox. $15 - 20\%$) y pulpers de tambor, como también los hay discontinuos y continuos. (IPPC, 2006).

Los contaminantes y los rechazos pesados son retirados continuamente durante el funcionamiento por un dispositivo (placa de tamizado) y enviados a un transportador de rechazos, para evitar que los contaminantes se rompan en trozos pequeños o que se acumulen en el pulper. Hay un uso creciente de pulpers secundarios para un posterior desfibrado, desagregado y limpieza de los rechazos pesados (HW) y ligeros (LW) mediante tambores de tamizado y otras tecnologías. Las instalaciones tienen diversas marcas, aunque todas ellas se basan en un funcionamiento similar. (IPPC, 2006).

1.2.3.3. Separación mecánica de impurezas

Los pequeños trozos de metal y de plástico se separan durante o después de la reconversión en pulpa, utilizando tamices, ciclones o centrifugación. En esta fase de limpieza de la pasta por medios mecánicos, se tiene una gran variedad de equipos. Estos son diseñados para remover los distintos tipos de contaminantes que pueden estar presentes. De acuerdo al mecanismo que opera en la separación se pueden dividir entre aquellos que separan por diferencias de tamaño y los que separan por diferencia de densidad. Entre los primeros, se encuentran los tamices, ya sean de agujeros o ranuras, presurizados o no, de alta o baja consistencia, etc. En el segundo grupo, están los limpiadores centrífugos o hidrociclones, de los cuales existe gran variedad de diseños. (Hoyos & Lopez, 2006).

Por lo general, el sistema utilizado es una combinación de ambos tipos mencionados, y se puede decir que, casi todos los sistemas incorporan una secuencia de separación de contaminantes gruesos luego del pulpeado, seguida por una etapa de tamizado fino y por ultimo una limpieza centrífuga. Los parámetros principales que caracterizan la separación de este tipo de equipos son la eficiencia de remoción de contaminantes y la tasa de rechazo de sólidos. Cuanto mayor sea la tasa de rechazo mayor será la eficiencia de remoción, pero también lo será la pérdida de fibras, por tanto, ambos parámetros deben ser controlados. (Hoyos & Lopez, 2006).

El proceso de tamizado se utiliza para separar las partículas más grandes que las aberturas de las cestas perforadas. La selección del tipo de tamiz depende del producto final y la calidad de la composición de fibra utilizada. La depuración de agujeros o en alta consistencia (consistencia 3-4%) para la eliminación de contaminantes gruesos durante la preparación de la pasta puede distinguirse de la depuración fina o de ranuras en el flujo de aproximación (consistencia del 1%) a la máquina de papel. Los dispositivos aplicados son similares en su funcionamiento, pero tienen distintas aperturas de separación. (IPPC, 2006).

Según la calidad de la composición a conseguir, la planta de preparación de pasta para proceso de papel recuperado debe estar equipada con máquinas adicionales tales como fraccionadores, dispersores o refinos. Un fraccionador separa la pasta en dos fracciones que permiten tratar las fibras cortas y largas de la mezcla de pasta en modos distintos. También puede aplicarse el proceso de dispersión, de alto consumo de energía, para conseguir una mejor unión entre fibras (mejores características de resistencia) en el papel producido y reducir el tamaño de las motas sucias visibles. Antes de la dispersión el contenido de materia seca de la pasta debe aumentarse desde un

$5 - 12\%$ a un $25 - 30\%$, ya que la dispersión requiere fuertes fuerzas de fricción y temperaturas elevadas de unos 95°C o más. Luego de esto la pasta vuelve a diluirse. (IPPC, 2006).

Una planta de preparación de pasta para el proceso de papel recuperado puede equiparse opcionalmente de refinos para mejorar las características ópticas y de resistencia del papel. El refino está asociado con una demanda energética sustancial. De manera más precisa, el refino, tiene la finalidad de acondicionar las fibras para crear las características requeridas del producto acabado. El refino se realiza en equipos compuestos por un disco giratorio que se presiona sobre un estator. La energía eléctrica consumida en el refino como parte del proceso de la fabricación de papel es generalmente del orden $100 - 500\ kWh/t$ para la mayoría de los papeles, pero puede ser de hasta $3000\ kWh/t$ para papeles especiales. Así, para una fábrica de papel no integrada que utilice pasta química, el refino representará el mayor consumo de energía eléctrica (siendo el secado el mayor consumo de calor). Prácticamente todo el aporte de energía a este refino se convertirá en calor y aquí no hay opción para la recuperación de energía, aunque este calor generado contribuye a la temperatura elevada buscada en el proceso. (IPPC, 2006).

1.2.3.4. Procesos de destintado por flotación

Luego de estos procesos de "limpieza" de solidos de mayor tamaño y densidad, se da paso a un proceso de flotación. Este tiene como objetivo remover contaminantes de menor tamaño y densidad que no hayan podido ser eliminados en las fases anteriores, dentro de los cuales destacan principalmente las tintas, colas y resinas. Un requisito previo para un destintado acertado es que las partículas de tinta se liberan de las fibras y se mantengan en dispersión. Con este fin se agregan agentes químicos de destintado, como $NaOH$, silicato sódico, peróxido de hidrógeno, jabones o ácidos grasos y agentes quelantes, sobre todo en la secuencia de preparación de pasta. Las partículas de tinta dispersadas se separan luego de la mezcla de fibras mediante técnicas de flotación (generalmente de multietapa). (IPPC, 2006).

Este proceso es llevado a cabo en una celda de flotación, que es un recipiente de tipo tanque agitado en el cual se introduce una suspensión acuosa de las dos sustancias a separar, las fibras de celulosa y las partículas de tinta despegadas de la fibra. La introducción de burbujas de aire en la parte inferior de la celda, en general, debajo del sistema de agitación cuyo propósito es no solo de agitar la suspensión, sino, también dividir las burbujas de aire hasta dimensiones mínimas. El ajuste físico-químico-mecánico es tal que las burbujitas de aire se adhieren a las partículas de tinta, pero no a las fibras, esto con la ayuda de aditivos químicos. Como consecuencia, las partículas de tinta son arrastradas hacia arriba con las burbujas de aire. El sistema contiene un agente espumante que estabiliza la espuma formada y permite formar una espuma rígida casi seca llamada "froth" en inglés, facilitando la extracción de esta y por ende los contaminantes. (Rojas & Bullon, 2007).

Según tamaño y la construcción de las células, puede haber varias células en serie para alcanzar un tiempo de estancia apropiado para la eliminación de la tinta. Para reducir la pérdida de fibra con el lodo de destintado, la espuma de las células primarias se trata a menudo con células secundarias en cascada. La espuma de destintado y los rechazos se deshidratan por separado en

una centrífuga o filtro prensa hasta un 50% de materia seca. El lodo de destintado es incinerado o desechado en vertedero. (IPPC, 2006).

Finalmente, después del destintado, la pasta se espesa y a veces se lava usando filtro de bandas, espesadores (de disco), prensas de tornillo, y lavapastas. (IPPC, 2006).

1.2.3.5. Blanqueo

La siguiente etapa en la fabricación de pasta reciclada corresponde al blanqueo, la cual es similar al proceso de blanqueo de celulosa. Esta, es una etapa vital del proceso de recuperación del material reciclado, la cual contribuye a lograr las características ópticas necesarias en una pulpa destintada. Las fibras recicladas sin blanquear se utilizan para la producción de papeles de embalaje y cartón. Por razones económicas, el blanqueamiento sólo ocurre cuando el papel manufacturado con fibras recicladas, requiere características ópticas como la blancura y el brillo. El blanqueo en el procesado de fibras recicladas, está integrado con el proceso, donde en base a la adición de agentes blanqueadores las partículas de tinta son removidas del sustrato fibroso, extrayéndolas por medio de procesos de lavado, flotación o sucesión de ambos. Las pulpas destintadas y blanqueadas, son usadas en la producción de papeles para impresión, papeles de oficina y papeles tissue. (Weinstock, 1993).

El blanqueo tiene la desventaja de que puede reducir la longitud de la fibra y, por consiguiente, disminuir la calidad final del papel. Los agentes blanqueantes utilizados en la producción de pasta reciclada son en general similares a los empleados en las operaciones de abrillantado de la pasta mecánica.(Taschke, y otros, 1998). Generalmente se utilizan peróxido de hidrógeno, hidrosulfito o ácido formamidín sulfínico. El blanqueo con peróxido de hidrógeno se realiza en presencia de $NaOH$, silicato sódico y en ocasiones agentes quelantes. Para pasta de fibra secundaria casi sin pasta mecánica pueden usarse agentes de blanqueo denominados no convencionales, como oxígeno y ozono. (IPPC, 2006).

1.2.3.6. Depósito de almacenaje y/o de mezcla (Cuba máquina)

Por último, la pasta se bombea a tinas de almacenaje o de mezcla. Estos depósitos sirven como depósito intermedio entre la preparación de la pasta y la máquina de papel, facilitando la continuidad de proceso. En los depósitos de mezcla se agregan los aditivos requeridos y se ajusta la consistencia correcta de la fibra para una formación apropiada de la hoja en la máquina de papel. (IPPC, 2006).

1.2.4.Trasformación de Pasta en Productos Comerciales

Los productos de finales fabricados por una industria de pasta y papel dependen del tipo de proceso en que se haya incurrido para la elaboración de la pasta de celulosa. Así, a partir de esta materia prima y a sus respectivas características entregadas por el proceso de fabricación, es posible elaborar posteriormente diversos tipos de papeles y cartones. (Taschke, y otros, 1998).

A continuación, se describe en términos generales los procesos involucrados para convertir la pasta de celulosa en productos finales para su posterior comercialización como; fardos de celulosa, papeles y cartones.

1.2.4.1. Fardos de celulosa

Para la elaboración de celulosa como producto final el primer proceso consta de una fase de separación (tamizado) y limpieza, mediante harneros y limpiadores ciclónicos respectivamente. Se ajusta su consistencia entre el 4 al 10 % antes de que esté preparada para ingresar a la máquina. Realizado esto, es cuando se alimenta de pasta a un equipo denominado Fourdrinier, donde se extiende en una tela metálica móvil o malla de plástico (conocida como "rejilla") en el "extremo húmedo" de la máquina de pasta, donde los operadores vigilan la velocidad de la cinta en movimiento y el contenido de agua. Parte del agua es drenada por gravedad a través de la cinta, eliminando la humedad de la fibra y formando una hoja continua. (Celulosa Arauco, 2014).

Posteriormente la hoja de pasta pasa a través de una serie de rodillos rotatorios ("prensas") que escurren el agua y el aire hasta que la consistencia es de alrededor del 40 al 45 %. Luego, la hoja pasa a través de una serie de pisos de secadores de aire caliente hasta que la consistencia sea del 90 al 95 %. Finalmente, la lámina continua se corta en pliegos y se apila en fardos. Los fardos de pasta se comprimen, se embalan y se empaquetan en resmas para su almacenamiento y posterior transporte para su comercialización. (Taschke, y otros, 1998). A continuación, se expone un diagrama de flujo del proceso anteriormente descrito.

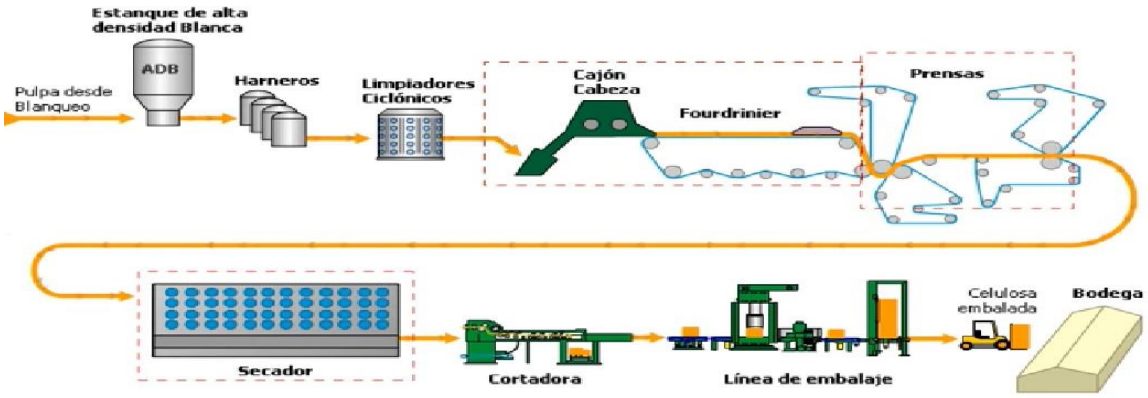


Figura 10: Diagrama de flujo de la máquina de pasta papelera. Fuente: Celulosa Arauco 2014.

1.2.4.2. Papeles y cartones

La elaboración de papel bastante similar a la producción de hojas de pasta de celulosa, sin embargo, la fabricación de papel o cartones es bastante más compleja. Esto se debe a que algunas papeleras emplean un surtido de diferentes pastas para optimizar la calidad del papel (por ejemplo, una mezcla de madera dura, madera blanda, kraft, sulfito, pasta mecánica o reciclada).

Dependiendo del tipo de pasta utilizada, hay que seguir una serie de pasos para obtener la hoja de papel. Además, dependiendo del producto a elaborar, se le añaden algunos aditivos (Taschke, y otros, 1998).

Otra diferencia, con respecto a la fabricación de celulosa, es que las máquinas que producen papel o cartones la hoja "corre" a una velocidad mayor, debido a características propias del proceso. (IPPC, 2006).

Particularmente, para los cartones, el proceso difiere en cuanto al modo en que se forma la hoja para darle grosor, en la combinación de múltiples capas y en los procesos de secado. El cartón se puede fabricar en hojas formadas por una o por varias capas, con núcleo o sin él. Generalmente, las hojas son de pasta papelera kraft (o kraft y CTMP mezcladas) de alta calidad, mientras que el núcleo se produce o con una mezcla de pasta semi-química y pasta reciclada barata, o totalmente de pasta reciclada y otros materiales de desecho. (Taschke, y otros, 1998).

Por otro lado, procesos secundarios que le confieren al producto ciertas propiedades y/o características como; encolado, estucado, color, calandrado y adición de aditivos químicos, se presentan de acuerdo con la finalidad que tiene este. (Taschke, y otros, 1998). En la sección de anexo se detallan estos procesos.

1.2.5. Demanda del recurso hídrico por parte de la industria de celulosa y papel

Particularmente, dentro del sector industrial de Chile, se tiene que el consumo de agua por parte de la industria de celulosa y papel equivale a alrededor de un 30% de la demanda de este recurso. El agua, en estas industrias, se utiliza en diversas fases del proceso, como agente de lavado, refrigeración, base de la mezcla, entre otros. Entre 1996 y 2002, la industria de la celulosa ha aumentado en más de cuatro veces la cantidad total de derechos de aprovechamiento de recursos hídricos que le faculta extraer agua de los cursos y cuerpos de agua. (Peña, Luraschi, & Valenzuela, 2004).

A pesar de lo anterior, se tiene que la eficiencia en cuanto al uso de agua en la industria chilena está en aumento, debido a los avances tecnológicos y mejoras que se han implementado a los ciclos productivos. En la actualidad, en las industrias de celulosa se consumen $40 - 60\ [m^3]$ de agua por tonelada de producto, mientras que en la década de 1980 el consumo era de alrededor de $130[m^3]$ por tonelada, evidenciando una clara disminución en cuanto al consumo de agua requerida para la producción de celulosa. (Luraschi, 2007).

Ahora bien, cabe destacar que la utilización de agua dependerá del tipo de pasta de celulosa elaborada, ya sea química (sulfatada o al sulfito) o mecánica, de la tecnología existente en fábrica, el nivel de cerrado de los circuitos de agua y de la gestión que se haga sobre este recurso. Para el proceso Kraft se tiene que el consumo de agua fresca varía entre $15 - 100\ [m^3]$ por tonelada producida, donde esta enorme variación tiene su justificación en las condicionantes expuestas

anteriormente. En tanto para plantas que fabrican celulosa al sulfito, se tiene que su consumo es de alrededor de $70[m^3/ADt]$. (IPPC, 2006).

A continuación, se expone una tabla con los consumos de agua de pasta mecánica por tipo.

Tabla 2: Consumo de agua en fábricas de pasta mecánica según tipo de proceso. No se incluye el consumo de la fábrica de papel. Fuente: IPPC, 2006.

Proceso	m^3/ADt de pasta
Mecánico	5 - 15
TMP	4 - 10
CTMP	15 - 50

En cuanto a las plantas que emplean fibra recuperada para la elaboración de pastas y cuentan con fábricas papeleras integradas, se tiene que los valores dependen del tipo de producto, como también de las tecnologías empleadas para la producción (IPPC, 2006). A continuación, se expone una gráfica que muestra los valores máximos y mínimos de consumo de agua de alimentación de en función del tipo de papel fabricado a partir de fibra recuperada.

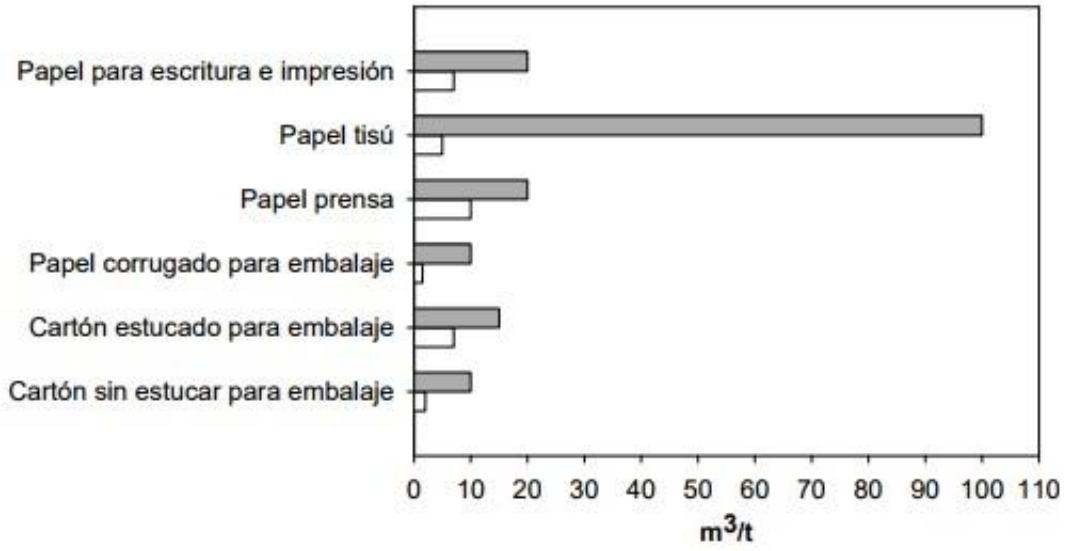


Figura 11: Valores máximos y mínimos de consumo de agua de alimentación por tonelada producida, para algunos productos fabricados a partir de fibra recuperada. Fuente: IPPC, 2006.

El agua de alimentación se emplea como agente de dispersión y transporte de la suspensión de fibras y aditivos a lo largo de todas las etapas del proceso productivo, desde la etapa de pulpado hasta la de formación. Por otro lado, el agua también se usa como fluido de intercambio de calor en torres de refrigeración y calderas, como cierre hidráulico en bombas de vacío o circulación de impulsión, así como en los rociadores de alta y baja presión (IPPC, 2010).

En tanto en las fábricas de papel se consume agua fresca principalmente en: (IPPC, 2006).

- Como agua de limpieza para la máquina de papel, mediante rociadores. La función de los rociadores es lubricar y limpiar las telas de formado y los fieltros de las prensas húmedas para mantener un comportamiento de deshidratación satisfactorio: $5 - 20 \left[m^3/_t\right]$
- Como agua de sellado y confinado en prensaestopas, cajas de aspiración, sistemas de vacío y limpiadores: $1 - 6 \left[m^3/_t\right]$
- Como disolvente y dispersante de cargas y aditivos: $1{,}5 - 3 \left[m^3/_t\right]$
- Para algunas calidades de papel: agua de aporte en la preparación de pasta.
- Refrigeración del equipo de proceso: $3 - 10 \left[m^3/_t\right]$. Estas aguas se suelen recircular y se utiliza como aguas de proceso. Otras fábricas las descargan por separado. Por consiguiente, estas aguas no se incluyen al reportar el consumo de agua de las fábricas de papel.
- Planta de energía: $2 - 3 \left[m^3/_t\right]$. Estas aguas no se incluyen normalmente al reportar el consumo de agua de las fábricas de papel.

En base a esto, la gestión integral y el aprovechamiento del recurso hídrico, son fundamentales para llevar a cabo un proceso de elaboración de manera eficiente y sustentable. En este marco, la reutilización de efluentes provenientes de procesos productivos cobra un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permiten aumentar la disponibilidad del recurso, sin necesidad de seguir explotando las fuentes convencionales para el suministro de agua. Actualmente existen tecnologías que permiten alcanzar un nivel de calidad de agua adecuado, para cualquier uso al que se piense destinar a esta agua "regenerada". Sin embargo, la literatura demuestra que a medida que los requisitos de calidad del agua son más exigentes, el proceso de tratamiento se hace más complejo y costoso. (Seguí Amórtegui, 2004).

1.2.6. Caracterización de efluentes provenientes de la industria papelera

En general, prácticamente todos los efluentes industriales presentan compuestos contaminantes que el medio receptor no puede degradar de manera natural y, la industria de celulosa y papel no es la excepción. Junto con este sector, la industria textil, química, farmacéutica, entre otras, generan grandes volúmenes de efluentes de naturaleza principalmente refractaria, es decir, que presentan resistencia a cambiar de estado o descomponerse en subproductos. Además, estos efluentes se reconocen por la capacidad de aumentar la cantidad de sustancias tóxicas lanzadas en los cuerpos de agua, afectando los ecosistemas acuáticos. (Pokhrel & Viraraghavan, 2004).

1.2.6.1. Efluentes provenientes de la industria de celulosa

Diversos efluentes industriales son ricos en materia orgánica disuelta, de la cual una parte es de difícil degradación y permanece reminiscente después del tratamiento por procesos biológicos. Tal es el caso de las industrias de celulosa, donde sus efluentes son altamente coloridos, debido principalmente a la presencia de lignina residual, y una variedad amplia de compuestos organoclorados, debido a la alta reactancia de los compuestos clorados con los orgánicos. Estos, son reconocidos como recalcitrantes, debido a su alta resistencia a la biodegradación. (Almeida, Assaline, & Rosa, 2004).

La presencia de compuestos organoclorados en los efluentes de la industria de celulosa se debe principalmente al proceso de blanqueamiento de la pasta celulósica., entre los cuales se pueden citar; clorofenol, clorobenzeno, cloroguaicol, dibenzofurano y dibenzodioxinas. (Savant, Abdul-Rahman, & Ranade, 2006).

Los compuestos organoclorados se dividen en: alto peso molecular (HMW) y bajo peso molecular (LMW). Los de bajo peso molecular son los principales responsables por los efectos de mutagenicidad y bioacumulación, debido a su característica hidrofóbica y por la facilidad de penetrar en las membranas celulares de los seres vivos. Sin embargo, los componentes de HMW son, generalmente inactivos biológicamente y tienen poca contribución en la toxicidad y mutagenicidad. (Savant, Abdul-Rahman & Ranade, 2006). De esta forma, la presencia de organoclorados en los efluentes es preocupante debido a los grandes riesgos en términos de mutagénicos, cancerigenos y tóxicos provocados al ecosistema acuático y seres vivos en general. De hecho, los mismos estudios demuestran una correlación positiva entre materia orgánica disuelta reminiscente en los efluentes de la industria de celulosa y la toxicidad ejercida sobre los organismos acuáticos.

Figura 12: Estanque ecualizador de aguas contaminadas de industria papelera. Fuente: Celulosa Arauco, 2014.

A continuación, se exponen tablas e información con los rangos de cargas orgánicas y otros parámetros contaminantes de efluentes que genera una planta de celulosa mecánica, Kraft y al sulfito respectivamente.

- **Efluentes Pasta Mecánica**

Tabla 3:Cargas específicas típicas como DBO_5, DQO y nutrientes en el agua de la fabricación de pasta mecánica de abeto noruego (Picea abies) antes del tratamiento externo. Fuente: BAT Report, 1997.

Proceso de desfibrado	Rdto. [%]	DBO_5 [kg/t]	DQO [kg/t]	Nitrógeno [g/t]	Fósforo [g/t]
GW	96-97	8.5-10	20-30	80-100	20-25
PGW	95-96	10-13	30-50	90-110	20-30
PGW-S	95-96	11-14	45-55		
RMP	95-96	10-15	40-60	90-110	20-30
TMP	94-95	13-22	50-80	100-130	30-40
CTMP (CTMP blanqueada)	92-94 (91-93)	17-30 (25-50)	60-100 (80-130)	110-140 (130-400)	35-45 (50-60)

- **Efluentes Pasta Kraft**

Tabla 4: Descargas de sustancias orgánicas de fábricas de pasta kraft antes del tratamiento externo. Las diferencias entre fibra larga y dura son bastante pequeñas, y las siguientes cifras para subprocesos no se monitorizan de forma continua, mientras que la cifra total está basada en los datos disponibles sobre medias anuales y en un muestreo continuo y proporcional al caudal. Fuente OSPAR, 1994.

Etapa de proceso	DQO kg/ADt
Manipulación de madera	1 - 10
Condensados	2 - 8
Fugas	2 - 10
Pérdida de lavado	6 - 12
Blanqueo	15 - 65
Total fábricas	**31 - 105**

Tabla 5:Rango de nutrientes presentes en los efluentes de plantas de celulosa Kraft. Fuente OSPAR, 1994.

Proceso	Fósforo kg/ADt	Nitrógeno kg/ADt
Sin blanqueo	0,01-0,04	0,2-0,4
Planta de blanqueo	0,04 –0,06	<0,1*
Total fábrica	**0, 05 –0,10**	**0,2-0,4***

Tabla 6: Descarga de metales en efluentes de fábrica de pasta Kraft.. Fuente OSPAR, 1994.

	Cd	Pb	Cu	Cr	Ni	Zn
Pasta sin blanquear	0,03	0,3	0,5	0,2	0,4	5
Pasta blanqueada	0,1	0,4	1	0,7	0,9	15

- **Efluentes Pasta al Sulfito**

Generalmente, los datos disponibles para el proceso al sulfito son mucho más limitados que en el proceso kraft. Sin embargo, de la información disponible puede derivarse que las emisiones totales de sustancias orgánicas (medidas como DQO) antes del tratamiento varían entre $80\ y\ 200\ kg/t$. Los datos disponibles indican que los efluentes totales de fábricas modernizadas de pasta al sulfito son un 50 - 100 % más altos que los de las fábricas modernizadas de pasta kraft debido a que los procesos son menos cerrados. En cuanto a los metales pasados se tiene que los niveles son prácticamente 10 veces más altos que los que se tienen en una planta de pasta Kraft. (IPPC, 2006).

De manera general, las plantas de tratamiento de efluentes con sistemas biológicos (microorganismos), operadas en las industrias, consiguen atender los valores de vertimientos correspondientes a la materia orgánica biodegradable medida como DBO_5; sin embargo, los valores relativos a DQO (demanda química de oxígeno) y color resultan más difíciles de cumplir. Los procesos biológicos generalmente no remueven elementos recalcitrantes y consiguen bajas reducciones de DQO y/o CO_d (carbono orgánico disuelto), en consecuencia, la presencia de compuestos recalcitrantes se convierte en un factor perjudicial en este tipo de sistemas. Inclusive, en la mayoría de los casos, concentraciones altas de estos compuestos biorefractarios pueden inhibir el rendimiento y ser tóxicos para la biota responsable por la remoción de los contaminantes, con diversas consecuencias y efectos negativos a los ecosistemas acuáticos. (Raj & Quen, 2005).

1.2.6.2. Efluentes de provenientes de planta de fibra recuperada y papelera

Las emisiones de efluentes provenientes de la industria del papel a los cuerpos receptores en particular están estrechamente relacionadas con los requisitos fijados para las calidades de papel, la calidad de las materias primas y las técnicas de eliminación aplicadas. Los aditivos usados, la gestión interna del proceso, la limpieza y orden, así como el estado técnico de la instalación tienen también un efecto en los niveles de emisiones alcanzados. (IPPC, 2006).

- **Efluentes de preparación de pasta FRC**

Las aguas residuales de una fábrica de papel a base de FRC (fibra recuperada) se generan principalmente durante los pasos de limpieza. Es práctica común retirar las aguas residuales en los lugares donde se contamina especialmente el agua de proceso. Sin embargo, la localización de la generación de las aguas residuales varía de una fábrica a otra. El agua de proceso se contamina principalmente durante la limpieza, el destintado y la recuperación de fibra. (IPPC, 2006).

A continuación, se exponen tablas donde se recopilaron datos medios de emisiones al agua después del tratamiento exclusivamente primario, correspondientes a fábricas de papel a base de FRC, así como los datos correspondientes a las fábricas que incorporan tratamiento biológico in situ. (IPPC, 2006).

Tabla 7: Emisiones medias al agua de fábricas a base de FRC después de tratamiento primario y antes de su descarga a una planta de tratamiento de aguas residuales. Fuente: BAT 1996.

Parámetro	Sin destintado		Fábricas con destintado	
	mg/l (mín-máx)	kg/t (mín-máx)	mg/l (mín-máx)	kg/t (mín-máx)
DBO_5 1)	1900	4,7	550	10
DQO	3800 (570 - 9000)	9,4 (1,2-24)	1100 (440 - 1900)	20 (7 - 40)
Kj-N 2)	16 (10 - 40)	0,05 (0,02 – 0,1)	20 (13 - 25)	0.35 (0,19-0,62)
Volumen vertido		5,5 (0,4-15,5) m^3/t		15 (9 - 39) m^3/t

Notas:
1) El valor de DBO_5 se estima suponiendo que DQO = 2* DBO_5 [Dutch note on BAT, 1996].
2) El Nitrógeno de Kjeldahl es la suma de nitrógeno orgánico y amónico. Parte del N orgánico puede hidrolizarse durante el tratamiento de efluentes, el N amónico es un nutriente potencial para la biomasa de la planta de tratamiento.

Tabla 8: Emisiones medias de planta de FRC a cuerpos de agua luego de tratamiento primario y biológico. Fuente: BAT 1996.

Parámetro	Sin destintado		Fábricas con destintado	
	mg/l (mín-máx)	kg/t (mín-máx)	mg/l (mín-máx)	kg/t (mín-máx)
DBO_5 antes del tratamiento *	1800	12,3	770	8,3
DBO_5 después del tratamiento	10 (3 - 28)	0,06 (0,01 – 0,13)	9	0,09
DQO antes del tratamiento *	3200	22	1900	21
DQO después del tratamiento	150 (60 - 270)	0,77 (0,29 – 1,12)	290	3,1
Kj-N 1)	5.6 (3 - 13)	0,03 (0,01 – 0,04)	7,8	0,08
P_{tot}	1.5 (0.5 - 1.8)	0,01	n.d.	n.d.
SST	25 (17 - 40)	0,13 (0,06 – 0,21)	n.d.	n.d.
Volumen vertido		5,7 (3,1-11) m^3/t		11 m^3/t

Notas:

* No había datos de DBO_5 de los influentes. Por consiguiente, los datos de los influentes se calculan en base a los datos de carga de las aguas residuales de una fábrica con destintado [Dutch note on BAT, 1996].

1) El valor del N de Kjeldahl después del tratamiento de efluentes da sólo una indicación de la cantidad de N orgánico en el efluente, y no cubre la carga total de N, que incluye los compuestos de N oxidado, nitratos y nitritos.

Los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales contienen concentraciones bajas de nutrientes en forma de nitrógeno y de fosfatos. La presencia de estos compuestos es causada principalmente por la adición necesaria de estos nutrientes para el funcionamiento eficaz de la planta de tratamiento biológico, que necesita un suministro de nutrientes del orden de, DBO5 : N : P = 100 : 5 : 1. (IPPC, 2006).

Las concentraciones de metales pesados en efluentes de fábricas de papel son generalmente insignificantes. No hay un aumento significativo en las concentraciones si se utilizan fibras secundarias. Sin embargo, mediciones ocasionales de fábricas holandesas de proceso con destintado han demostrado que algunos efluentes de fábricas de proceso con destintado pueden contener concentraciones elevadas de cobre y zinc. En ese caso, la tinta de impresión del papel recuperado se considera que es la fuente principal de metales pesados. Los metales pesados observados ocasionalmente en los efluentes están principalmente en forma de complejos orgánicos estables. (IPPC, 2006).

Por otra parte, las fuentes de compuestos orgánicos halogenados absorbibles son algunos aditivos (especialmente agentes de resistencia en húmedo), papel recuperado a base de pasta blanqueada al cloro y en cierta medida las tintas de impresión. En cuanto a las sales, principalmente sulfatos y cloruros, se introducen principalmente a través del papel recuperado y algunos aditivos como el alumbre. (IPPC, 2006).

- ## Efluentes de elaboración de papeles y cartones

Existen diferentes fuentes de descarga a aguas residuales en las fábricas de papel, entre las cuales destacan: (IPPC, 2006).

- **Rechazos de limpieza de pasta:** la pasta se limpia antes de la máquina de papel para eliminar impurezas. Los rechazos de los depuradores contienen las impurezas (ej: grumos y arena).

- **Exceso de agua blanca:** el agua de proceso, junto con los aditivos químicos aplicados, se desagua en la sección de tela de la máquina de papel, en su mayor parte, y luego se acaba de eliminar del papel en la sección de secado. El agua blanca también contiene el agua expulsada por los rociadores para la limpieza de las telas y fieltros. Esta contiene altos niveles de sólidos en suspensión y materia orgánica.

- **Descargas temporales y accidentales:** estas descargas no están directamente relacionadas con el proceso y ocurren intermitentemente. Ejemplos de las mismas son los rebosamientos de agua blanca o incluso de pasta de los depósitos u otros equipos con un mal control de nivel, agua de lavado usada en la limpieza del equipo y agua de enjuague del lavado de suelos, etc.

- **Aguas de refrigeración y sellado:** las aguas de refrigeración usadas y las aguas de sellado del sistema de vacío y bombas, no suelen contener sólidos en suspensión. Estas aguas se suelen reciclar en cierto grado. Las aguas de refrigeración limpias deben ser separadas de los otros efluentes con el fin de minimizar la carga sobre las plantas de tratamiento y mantener su eficacia.

A continuación, se expone una tabla con los rangos de los parámetros claves de los efluentes provenientes de fábricas de papel francesas que producen papeles de diferentes tipos y calidades. Esta tabla sólo puede dar una indicación acerca de las emisiones típicas, ya que no se han presentado otras especificaciones o suposiciones, y hay variaciones dentro de cada categoría. (IPPC, 2006).

Tabla 9: Descargas típicas de fábricas papeleras por producto antes de cualquier tratamiento y después del tratamiento biológico de aguas residuales. Fuente: IPPC, 2006.

Tipo de papel	SST [kg/t]		DQO [kg/t]		DBO_5 [kg/t]	
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Impresión y escritura sin pasta mecánica	12 -25	0,3 - 2	7 -15	1.5 - 4	4 -8	0,4 – 0,8
Cartulina	2 - 8	0,3 - 1	5 -15	1.2 - 3	3 -7	0,3 – 0,6
Papel tisú	2- 30	0,3 – 3 [2)]	8 -15	1.2 - 6 [2)]	5 - 7	0,3 - 2 [2)]
Papel especial [1)]	20 - 100	0,1 - 6 [1)]	no hay datos	1.5 -8 [1)]	no hay datos	0,3 - 6 [1)]

Notas:

1) La cifra de papel especial se deriva de [SEPA-Report 4713-2, 1997] y representa los niveles comunes de emisiones al agua de estas fábricas en la UE. En este informe, después del tratamiento significa después del tratamiento primario solamente

2) El extremo superior del rango de emisiones para fábricas de papel tisú se deriva de información de la Asociación Papelera Alemana.

En cuanto al contenido de nutrientes (nitrógeno y fosforo), se tiene que su origen principal radica en la adición necesaria de dichos nutrientes para un funcionamiento eficaz de la planta de tratamiento biológico. Algunos aditivos químicos pueden también contener compuestos orgánicos nitrogenados. Por ejemplo, los blanqueantes ópticos pueden contener hasta un 30% de nitrógeno orgánico (urea). (IPPC, 2006).

Por otra parte, los AOX, presentan niveles relativamente bajos a menos que las pastas seas blanqueadas con compuestos clorados. De no ser así, las principales fuentes de compuestos orgánicos halogenados absorbibles son principalmente algunos aditivos (ej: agentes de resistencia en húmedo e impurezas como por ejemplo la epiclorhidrina) y en menor medida el agua de proceso tratada con desinfectantes que contienen cloro (si se aplica). (IPPC, 2006).

1.3. Aspectos legales sobre la política ambiental chilena y normativa de residuos líquidos industriales

El derecho ambiental surge en base a la necesidad de regular la explotación de los recursos naturales de manera sustentable y racional, con el fin de preservar el entorno social y el medio ambiental. Este, es un sistema compuesto de normas, las cuales se estructuran en dos temas; la protección del medio ambiente y el ordenamiento del medio ambiente. Buscando regular las acciones de conducta de la sociedad a través de normas y sanciones. En base a lo anterior surge la

legislación ambiental, resguardando la estabilidad funcional de los sistemas ambientales, la cual tiene su base en el ámbito constitucional y legal del medio ambiente. (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

La gestión ambiental, por parte del estado, se basa en una política ambiental, la cual está fundada sobre la base de tres conceptos principales, "Calidad de vida de las personas", "Complementariedad entre el desarrollo socioeconómico y la sustentabilidad ambiental" y "Equidad social y superación de la pobreza". Estos conceptos se enmarcan en el desarrollo sustentable, el cual proporciona el marco para la integración de las políticas ambientales y las estrategias de desarrollo social y económico. (Anónimo, 2005).

La política ambiental, se sustenta a partir de la legislación, la institucionalidad y los instrumentos de gestión ambiental. (Gestión Ambiental UTFSM, 2015). Para mayor información sobre la política ambiental chilena consultar el anexo.

Dentro de los instrumentos de gestión ambiental, se encuentran las normas de emisión, las cuales establecen límites a la cantidad de contaminantes emitidos al aire o al agua que pueden producir las instalaciones industriales o fuentes emisoras en general. El objetivo de estas normas puede ser la prevención de la contaminación o de sus efectos, o bien ser un medio para restablecer los niveles de calidad del aire o del agua cuando estos han sido sobrepasados. Su aplicación puede ser a nivel nacional o a nivel local dependiendo del objetivo de protección que tenga la norma. (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

En consecuencia, los instrumentos de gestión ambiental le permiten al Estado regular e incentivar la gestión ambiental a nivel nacional. Esto, trae como consecuencia la necesidad por parte de las organizaciones, fuentes emisoras de contaminación, adoptar estrategias que se enmarquen en la sustentabilidad, que busquen cumplir con las normas ambientales vigentes e idear planes de gestión de residuos eficaces. Todo esto con el fin, que la presencia de esta, no sea un agente de desequilibrio profundo en el medio ambiente.

1.3.1. Normas chilenas de emisión de residuos líquidos industriales

Los residuos líquidos industriales o Riles, son aguas de desecho generadas en establecimientos industriales como resultado de un proceso, actividad o servicio. Éstas contienen diversas sustancias de origen natural o artificial, que pueden ser más o menos dañinas para el hombre, los animales y el ambiente, en donde la composición de los Riles depende principalmente de su origen. (Núñez, 2009). En el Anexo se exponen las sustancias consideradas contaminantes o parámetros a controlar, junto con la definición de los más relevantes.

La Ley chilena 20.920 define residuo como cualquier "sustancia u objeto que su generador desecha o tiene la intención u obligación de desechar de acuerdo a la normativa vigente". Estos, dependiendo de la forma en que se manejan o gestionan es posible determinar si una empresa

genera residuos líquidos o no. Así, si estos residuos se almacenan en contenedores apropiados y luego se envían a empresas de valorización o disposición final en dichos contenedores, pasan a ser catalogados como residuos sólidos (en función del envase que los contiene). Pero, si las aguas residuales se descargan a través del alcantarillado, a cursos de agua o se infiltran al suelo son catalogados como residuos líquidos y deben caracterizarse para determinar si cumplen o no la normativa respectiva. (Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas , 2010).

Dicha caracterización comienza determinando si la empresa queda o no catalogada como Establecimiento Industrial (EI) generador de riles. Un establecimiento industrial (EI) que genera riles (residuos líquidos industriales) es aquel que, como resultado de su proceso, actividad o servicio, genera aguas residuales con una carga contaminante media diaria superior a la de una población de 100 habitantes, en uno o más de los parámetros indicados en las tablas publicadas en cada Norma de Emisión. (Ministerio de Obras Púbicas, 2000). En el anexo se adjunta una tabla que expone los parámetros y valores característicos de aguas servidas correspondientes a una población de 100 habitantes.

Así, un Establecimiento Industrial generador de residuos líquidos debe regirse en base a las normas de emisión, las cuales establecen la cantidad máxima permitida, la cual se mide en base a la concentración (unidades de masa por unidad de volumen), para un contaminante medido en el efluente de la fuente emisora y tienen por objetivo evitar la contaminación de los cuerpos de agua. El establecimiento de las normas debe considerar las condiciones ambientales propias de la zona en que se apliquen, y los parámetros exigibles y sus valores pueden basarse en las mejores técnicas disponibles. Estas se dictan mediante Decreto Supremo (DS) firmado por el Ministro de Medio Ambiente y por el Ministro competente según la materia de que se trate. Chile tiene tres normas de emisión: (Banco Mundial, 2011).

a. DS MOP n.º 609/1998 que regula las descargas de residuos líquidos industriales a los sistemas públicos de alcantarillado operados por las empresas sanitarias. Además de proteger las redes públicas de alcantarillado como los sistemas de tratamiento de aguas servidas, esta norma busca mejorar la calidad ambiental de las aguas servidas tratadas que las empresas de servicios sanitarios vierten en los cuerpos de agua, mediante el control de los contaminantes líquidos de origen industrial que se descargan al alcantarillado.

b. DS MINSEGPRES n.º 90/2000 que regula las descargas de aguas residuales por parte de los establecimientos industriales y de las empresas de servicios sanitarios a aguas superficiales y marinas. Esta norma se encuentra en proceso de revisión, en la etapa de observaciones al anteproyecto de norma.

c. DS MINSEGPRES n.º 46/2002 que regula las descargas de aguas residuales que se disponen mediante infiltración hacia las aguas subterráneas. Esta norma se encuentra también en proceso de revisión, en la etapa de observaciones al anteproyecto de norma.

Es importante mencionar que los residuos industriales líquidos no podrán contener sustancias radiactivas, corrosivas, venenosas, infecciosas, explosivas o inflamables, sean éstas sólidas, líquidas, gases o vapores, y otras de carácter peligroso en conformidad a la legislación y

reglamentación vigente. En esta misma línea, los sedimentos, lodos y/o sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de residuos industriales líquidos no deben disponerse en cuerpos receptores o en servicios públicos de recolección de aguas servidas y su disposición final debe cumplir con las normas legales vigentes en materia de residuos sólidos. (Ministerio de Obras Púbicas, 2000).

Dichas normas son de aplicación general en todo el país según el tipo de descarga que se realice al medio receptor. De esta manera, establecidos los parámetros contaminantes y sus límites máximos, los volúmenes de descarga y los caudales locales de dilución, es posible realizar mediciones en los efluentes, con el fin de evaluar y controlar si los parámetros contaminantes se encuentran en el rango de concentración aceptable según norma. (Banco Mundial, 2011). Para mayor información respecto al contenido de dichas normas y los parámetros de control revisar la documentación online existente en la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) en caso de acogerse al D.S. N° 609/1998 o en la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) en caso a de acogerse al D.S. N° 90/2000 o D.S. N° 42/2002.

La fiscalización de los Riles se realiza esencialmente por autocontrol de los contaminadores, donde se contratan con laboratorios acreditados. Según los casos, la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), la Dirección Nacional de Territorio Marítimo y Marina Mercante (DIRECTEMAR), las empresas sanitarias, o la SMA, aprueban los programas de monitoreo de las descargas, reciben y procesan la información de autocontroles y, con esto, realizan controles directos aleatorios y sin aviso previo, para corroborar la información entregada. Además, la SISS realiza fiscalizaciones e inspecciones a establecimientos que declaran no generar Riles, con el fin de verificar esta condición. La SISS puede sancionar a los que no cumplan con las normas de emisión o instrucciones de la SISS, incluyendo multas de hasta 1,000 UTA y clausura parcial o total en el caso de un establecimiento industrial. (Banco Mundial, 2011).

En 2006 se hace plenamente exigible el D.S. n.° 90, lo que significa que desde esa fecha los establecimientos industriales y las empresas de servicios sanitarios se vieron en la obligación de cumplir la totalidad de los límites máximos establecidos en cada una de las tablas del decreto. De una manera general el cumplimento de las normas es bueno, debido al control y fiscalización efectivos, pero se debería mejorar en el caso de las descargas a aguas subterráneas, para las cuales las normas son mucho más exigentes. La SISS ahora tiene una oficina en cada región del país, pero el personal dedicado a controles en terreno sigue siendo limitado y sólo puede controlar alrededor de 400 puntos de vertimiento al año (13% de los contaminadores). En 2010, con la promulgación de la Ley n.° 20.417 el control de los establecimientos industriales ha pasado a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), con el objetivo de fortalecer todavía más la fiscalización. (Banco Mundial, 2011).

En el marco del autocontrol se tiene la Resolución de Programa de Monitoreo (RPM), la cual es una herramienta de fiscalización en donde se determinan las condiciones técnicas para que la fuente emisora ejecute el monitoreo y control de la calidad de sus efluentes. En la RPM se establecen los parámetros de monitoreo mensual y anual, los valores máximos de concentración de cada parámetro, así como la frecuencia en que deben ser medidos dentro del mes, entre otra

información. El procedimiento general de evaluación y tramitación de una RPM consta de 6 hitos relevantes, los cuales se indican a continuación: (Superintendencia de Medio Ambiente, 2015).

- **Aviso de Inicio de Descarga de Riles** (Formulario NE-DS90 "Aviso de Inicio de descarga"). Aquí se da aviso a la SMA 90 días antes que el proyecto comience a generar riles que serán dispuestos en aguas marinas o superficiales.
- **Aviso de Regulación de una Fuente No Catastrada** (Formulario NE-DS90 "Aviso de Regulación de Fuentes"). Este procedimiento consiste en informar a la SMA sobre la existencia de la descarga de efluentes.
- **Caracterización de RIL Crudo** (Formulario NE-DS90 "Caracterización de Riles Crudos"). Se coordina con una Entidad Técnica Fiscalizadora Ambiental (ETFA) la ejecución de una actividad de muestreo, medición y análisis del Ril crudo (previo tratamiento). Esto se realiza en cada punto de descarga, analizando los 42 parámetros establecidos en la tabla de "Establecimiento Emisor" del D.S. N° 90 del 2000 y además realizando mediciones de pH y caudal. Con esto, es posible calcular la Carga Contaminante Media Diaria (CCMD) de los parámetros en cuestión, para posteriormente enviar esta información a la SMA.
- **Calificación de la Fuente.** En base a los antecedentes entregados por el titular a la SMA, esta califica se la fuente es emisora o no y si se acoge al D.S. N° 90. Así, si los riles monitoreados tienen una CCMD o de valor característico superior en uno o más de los 42 parámetros establecidos en la tabla de Establecimiento Emisor se requiere un control permanente de la norma de emisión, y por tanto el titular recibirá por parte de la SMA una RPM.
- **Dictación de RPM.** La SMA dicta una RPM en donde se mantienen vigentes las condiciones de monitoreo establecidas anteriormente. Esta puede ser provisional o definitiva. A continuación, se expone una tabla tipo RPM donde se señalan los límites máximos permitidos en concentración para los contaminantes asociados a la descarga, el tipo de muestra que debe ser tomada para su determinación y su frecuencia.
- **Modificación de una RPM** (Formulario NE-DS90 "Solicitud de Modificación de una RPM"). Esto se realiza en caso de requerir una modificación del RPM dictado anteriormente. Esto puede deberse a la modificación del proceso productivo, modificaciones al proyecto original, modificaciones al tratamiento de riles, modificación en las consideraciones del RPM, cambio de razón social o titular, revocación RPM u otras solicitudes particulares.

Tabla 10: Ejemplo parámetros a monitorear en una RPM con sus respectivos límites máximos y tipos de muestras. Fuente SMA, 2016.

Parámetro	Unidad	Límite Máximo	Tipo de Muestra	Frecuencia Mensual
Caudal	m^3/h	1416	Puntual	Diario
pH	Unidad	6,0-8,5	Puntual	4
Temperatura	°C	35	Puntual	4
Cloruros	mg/L	400	Compuesta	2
Aceites y Grasas	mg/L	20	Compuesta	2
DBO_5	mgO_2/L	35	Compuesta	2
Fósforo	mg/L	10	Compuesta	2
Nitrógeno Total Kjeldahl.	mg/L	50	Compuesta	2
Poder Espumógeno	mm	7	Compuesta	2
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80	Compuesta	2

La RPM como herramienta es aplicable tanto al D.S. N° 90/2000 como al D.S. N°46/2002 donde el procedimiento de evaluación y tramitación es prácticamente el mismo, con excepción de los parámetros a controlar y sus valores. (Superintendencia de Medio Ambiente, 2015). En el anexo se expone un diagrama de flujo del procedimiento a seguir para la tramitación de una RPM y una tabla de caracterización de riles crudos según D.S. N° 90.

Por su parte, en el caso que los residuos industriales que son liberados a sistemas de alcantarillados, los parámetros contaminantes deben encontrarse los rangos señalados en la Norma establecida por el D.S. 609/98. En donde los mismos Servicios Sanitarios en conjunto con la SISS deben velar por el cumplimiento de dichos valores y estándares. (Ministerio de Obras Púbicas, 2000).

En cuanto a los criterios de cumplimiento, ya sea para cualquier Norma, se tiene que no se considerarán sobrepasados los límites máximos establecidos en las tablas de límites máximos de concentración si: (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

a) Analizadas 10 o menos muestras mensuales, incluyendo los remuestreos, sólo una de ellas excede, en uno o más contaminantes, hasta en un 100% el límite máximo establecido en las referidas tablas.
b) Analizadas un 10% de las muestras, incluyendo los remuestreos, sólo un 10% excede, en uno o más contaminantes, hasta en un 100% el límite máximo establecido en las referidas tablas.

Considerando el importante crecimiento económico de estas últimas décadas, hay un consenso general de que las normas de emisión han permitido reducir el nivel de contaminación generado por las descargas. El tratamiento de las aguas servidas urbanas ha pasado de 17% en 1998 a 83%

en 2009, con un grado de cumplimiento de las normas ambientales de calidad de los efluentes que descargan las plantas de 99% en 2009. Además, en 2009, de los casi 4,000 establecimientos que tienen que cumplir con las normas de emisión, 71% de los establecimientos industriales que descargan a redes de alcantarillado público, 91% de los que descargan a cursos de aguas superficiales continentales y 69% de los que descargan a aguas subterráneas cumplen con las normas de emisión. Por otro lado, la incidencia enfermedades de origen hídrico ha disminuido sustancialmente desde el año 2000. (Banco Mundial, 2011).

1.4. Sistemas y tecnologías de tratamiento de aguas

La importancia del sector industrial en la economía global es indiscutible, sin embargo, los aportes que realiza este sector al desarrollo económico a nivel mundial son fuertemente opacados por los problemas significativos que genera la presencia de establecimientos industriales en el medio ambiente. (Rodriguez, Botelho, & Clevo, 2008).

Los procesos productivos básicamente transforman materias primas en productos elaborados comercializables. Para esto, prácticamente la totalidad de ellos requieren diversos tipos de insumos, algunos de ellos considerados contaminantes para el entorno, y destacando la utilización de energía y agua de manera transversal en los diversos sectores económicos. Estos, son utilizados en diferentes fases del proceso, por los distintos equipos y tecnologías, que permiten elaboración del producto deseado.

La utilización de agua a nivel industrial posee diferentes fines, entre los cuales destacan; la refrigeración de equipos, base de mezcla de productos, dilución de sustancias químicas, agente de lavado y limpieza, base para la generación de vapor en calderas, entre otros. Para desempeñar estas funciones el recurso hídrico debe contar con ciertos tratamientos previos que le entreguen ciertas propiedades, ya sea añadiendo sustancias químicas que potencien sus prestaciones o extrayendo componentes que posee el agua que resultan perjudiciales para el proceso o equipos.

En este último caso, las industrias deben implementar sistemas de tratamiento de aguas de proceso, previos a que esta ingrese al este a desempeñar su función, con el fin de remover ciertos componentes de interés. Las tecnologías empleadas en dichos sistemas de tratamiento dependerán de la "calidad" de agua necesaria que se requiera dentro del proceso. Un ejemplo de esto son los sistemas de osmosis inversa, los cuales "filtran" en agua a partir de membranas semipermeables sometidas a diferencias de presión, con el fin de remover sales de cloro, sodio, magnesio, entre otras. De este modo, el agua "purificada" se encuentra libre de dichas sales perjudiciales para el proceso y puede ser utilizada en calderas y otros equipos que requieren agua de baja dureza en cuanto a sales minerales. Esta y otras tecnologías se profundizarán en las siguientes secciones.

Por otra parte, al finalizar cualquier proceso productivo, además de contar con el producto terminado listo para comercializar, se tiene como variable de salida diferentes tipos de residuos, ya sean sólidos, líquidos o emisiones atmosféricas, los cuales son generados en las diversas etapas del proceso. Estos, deben ser gestionados y tratados de manera que no sean un agente de

desequilibrio a nivel medio ambiental y social, ya que pueden destruir ecosistemas completos y afectar a la agricultura local, contaminando fuentes de recursos y de alimentación.

Lo anterior, conlleva a las organizaciones a adoptar estrategias que busquen minimizar la repercusión de estos residuos. Para esto, dichas instituciones cuentan con sistemas de gestión y tratamiento de residuos, llevando a cabo una producción que opere desde un punto de vista más sustentable, como también bajo los estándares de la legislación vigente aplicable.

1.4.1. Introducción a las plantas de tratamiento de residuos industriales

Las plantas de tratamiento de residuos industriales buscan dar respuesta a la necesidad que tienen las organizaciones de cumplir la normativa ambiental vigente, permitiendo que los efluentes (aguas servidas del proceso) liberados a los cuerpos receptores de agua o sistemas públicos de alcantarillado, cuenten con los estándares establecidos respecto a los parámetros considerados contaminantes y en consecuencia a controlar. Así, mediante procesos y tecnologías involucradas, es posible contar con efluentes de menor carga contaminante, tratando de minimizar las repercusiones negativas que tienen las industrias sobre el entorno ambiental y social.

A pesar de que el tratamiento del agua residual dependerá del uso que se le dará al efluente en cuestión, la naturaleza de este, el contexto operacional y los medios económicos con los cuales se cuente, se tiene que la clasificación de los procesos de manera convencional y a rasgos generales está compuesta de los siguientes tratamientos. (Rojas R. , 2002).

a) Tratamiento Preliminar: Está destinado a la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales con el objetivo específico de proteger las instalaciones y mejorar el funcionamiento de las obras de tratamiento aguas abajo. Este proceso es más bien físico buscando eliminar sólidos de tamaños mayores, empleando desbaste, desarenado, tamizado homogenización, entre otros procesos.

b) Tratamiento Primario: Es un conjunto de procesos que tienen como objetivo la separación por medios físicos de las partículas en suspensión mediante técnicas de coagulación, floculación, sedimentación y flotación. En esta sección en ocasiones se realiza una oxidación química, de manera de facilitar la posterior degradación de componentes en la próxima etapa.

c) Tratamiento Secundario: Es un conjunto de procesos que tiene como fin degradar la materia orgánica de las aguas residuales. Se emplean microorganismos los cuales convierten la materia orgánica en sólidos sedimentables floculentos (aglutinados), que puedan ser separados por sedimentación en tanques de decantación y luego ser removidos.

d) Tratamiento Avanzado o Terciario: Tiene como objetivo complementar los procesos anteriormente indicados para lograr efluentes más “puros”, con menor carga contaminante

y que puedan ser utilizados para diferentes usos como; recarga de acuíferos, recreación, agua industrial, etc. Los procesos de tratamiento de esta categoría están conformados por procesos físicos, químicos y biológicos, eliminando fosfatos, nitratos, parásitos, bacterias y virus mediante desinfección, minerales, sólidos totales y disueltos. En general, cualquier componente perjudicial para el uso que se le desee dar a este recurso.

e) Desinfección: Se emplea para reducir principalmente el contenido de bacterias, virus y quistes amebianos en las aguas residuales tratadas, previo a su disposición final. La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades. La desinfección suele realizarse mediante agentes químicos, físicos, mecánicos y radiación. De ellos el más utilizado es la desinfección química con cloro.

Figura 13: Piscinas de decantado utilizadas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

En las siguientes secciones se profundiza sobre las diversas tecnologías empleadas en las distintas fases del proceso de tratamiento de aguas, exponiendo su principio de funcionamiento y los componentes que dichas tecnologías buscan remover.

Es importante mencionar que, al momento de llevar a cabo los procesos anteriormente descritos, se generan residuos sólidos a los que se les denomina lodos. Estos, según Rojas (2002), provienen de rejas, desarenadores, tratamientos biológicos y sedimentadores, primarios como secundario y vienen a conformar la parte más importante de los subproductos generados en el proceso de tratamiento de aguas. Los lodos antes de su disposición final deben ser acondicionados a causa del alto contenido de materia orgánica putrescible, la cual de ninguna manera puede ser dispuesta libremente y en consecuencia deben gestionarse de forma adecuada.

Dentro de los procesos típicos de manejo de lodos se tienen; concentración, espesamiento, digestión, acondicionamiento, deshidratación o secado, incineración y oxidación. De éstos, la digestión, incineración u oxidación por vía húmeda son los más empleados para la reducción de la materia orgánica, y la concentración, acondicionamiento y deshidratación para la eliminación de la humedad. (Rojas R. , 2002).

1.4.2.Alternativas tecnológicas en tratamiento de aguas

Para el tratamiento de aguas existen diversos tipos de tecnologías. Estas, presentan características singulares que se centran en conseguir una cierta calidad de agua, a partir de la degradación o clasificación, para su posterior eliminación, de sustancias particulares del agua que se busca tratar, ya sea para darle un uso en el propio proceso productivo o en los efluentes liberados a los cuerpos receptores.

Las tecnologías existentes pueden clasificarse según su principio básico de funcionamiento en tratamientos físicos, biológicos o químicos. Cada uno de estos tipos de tratamiento persigue un objetivo en particular que se alinea con el objetivo global, el cual es lograr una calidad de agua que satisfaga las necesidades establecidas, por el proceso o la normativa ambiental existente. Es por esto que, en la práctica, suele existir una fuerte interacción entre los diferentes tipos de tecnologías, operadas bajo distintos principios de funcionamiento, para lograr el objetivo final deseado.

Cabe mencionar que, con el fin de proteger las instalaciones de los sistemas de tratamiento de aguas, suele existir un "pre-tratamiento" de estas, donde se acondiciona el afluente o efluente (dependiendo del caso) antes de que ingrese al proceso de tratamiento en sí. Dentro de este proceso destaca el uso de; rejillas o tamices, con el fin de eliminar sólidos de gran tamaño; trituradores, que disminuyen o "desmenuzan" sólidos; desarenadores, los cuales eliminan arena y gravilla; desengrasadores, eliminando aceites y grasas; homogeneizadores de caudales, con el fin de estabilizar las variaciones de caudal y concentración de aguas residuales, permitiendo un proceso de tratamiento más eficiente aguas abajo, entre otros. (Rojas R. , 2002).

A continuación, se exponen diferentes alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas, clasificándolas según su principio de funcionamiento, es decir en procesos; físicos, biológicos y químicos.

1.4.2.1. Procesos Físicos.

- **Coagulación – Floculación**

Una gran parte de las impurezas existentes en el agua residual son de naturaleza coloidal ($0.001 - 1\ [\mu m]$) con carga negativa, de difícil sedimentación. La partícula coloidal cargada tiene un cierto potencial eléctrico con respecto a la solución neutra en la que se halla, potencial que decrece desde el centro eléctrico de la partícula hasta una distancia suficiente para que los efectos de la carga sean inapreciables. Se denomina entonces coagulación al proceso de adición de un

agente coagulante para provocar la desestabilización de las partículas coloidales tras eliminar las fuerzas que las mantienen separadas. Se realiza a velocidades de agitación elevadas, variando los tiempos de retención entre 1 y 3 minutos. (Hernández, 1990)

Por su parte, la floculación corresponde a la etapa posterior de agregación de las partículas desestabilizadas y tiene el objetivo de formar flóculos de mayor tamaño y fácilmente decantables ($> 100\ [\mu m]$). Esto se consigue aplicando una agitación lenta y prolongada, entre 15 y 30 minutos (Dulekgurgen, Dogruel, Karahan, & Orhon, 2006)

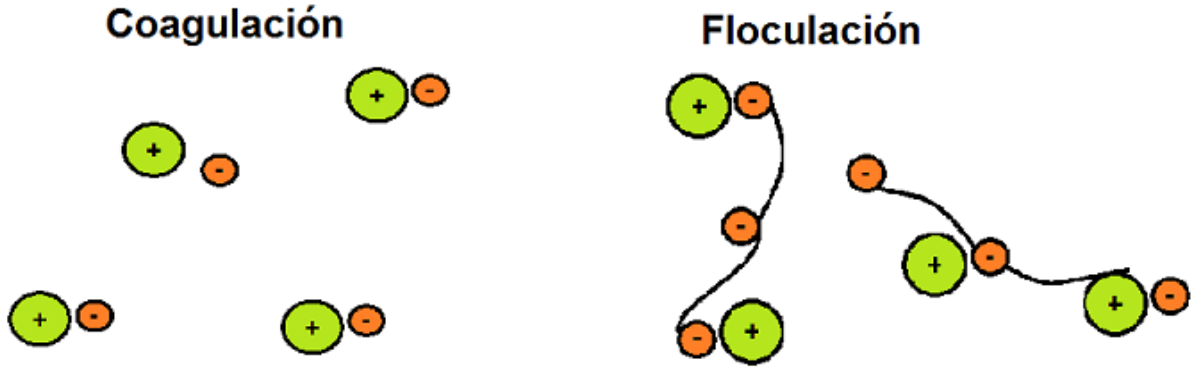


Figura 14: Efectos del proceso de coagulación y floculación. Suponiendo una partícula coloide de carga negativa, se añaden agentes coagulantes para desestabilizar las cargas y minimizar la repulsión entre las partículas. Luego el agente floculante permite crear puentes para aumentar el peso y tamaño de estas.

Así, el objetivo principal de este proceso es lograr un conglomerado de partículas de mayor tamaño y peso. Esto, con el fin de que posterior al proceso de coagulación-floculación; predomine la fuerza de atracción gravitacional, permitiendo que las partículas decanten en el fondo del estanque y de este modo sea posible removerlas y enviarlas a estanques concentradores. Por otra parte, este proceso facilita la filtración de las partículas debido al aumento de su tamaño inicial. Cabe mencionar que estos procesos coexisten en el estanque de decantado o clarificado, donde la turbulencia debe ser mínima siendo un punto crítico la entrada y salida de estos estanques. (Ordóñez, 2011).

Existen diferentes mecanismos de coagulación-floculación, entre los que destacan la compresión de la doble capa eléctrica, la adsorción y neutralización de cargas, formación de puentes entre las partículas y la coagulación por atrapamiento. (Ordóñez, 2011).

Generalmente, la coagulación se induce con la adición de sales metálicas al medio, como es el caso de los sulfatos o cloruros de hierro y de aluminio. Los polielectrolitos de estructuras diversas (i.e. poliacrilamidas, “chitosan”, polisacáridos o polivinilos), así como las sales de calcio, se emplean también como ayudantes de floculación con el objeto de aumentar la densidad de los flóculos formados, y con esto, favorecer su sedimentación. La combinación de poliacrilamidas aniónicas con sales metálicas ha resultado ser muy beneficiosa. Los flóculos formados son más

grandes y compactos, lo que influye en una reducción importante del tiempo de decantación a la vez que se generan menos lodos. (Aguilar, y otros, 2005). La combinación con poliacrilamidas catiónicas o incluso la sustitución total de las sales metálicas por estas últimas se ha estudiado también en estos últimos años. Para el tratamiento de los efluentes de las fábricas de pasta y papel, se ha propuesto como floculante más idóneo un polímero catiónico de alto peso molecular y baja densidad de carga. (Wong, Teng, Ahmad, Zuhairi, & Najafpour, 2006). De todas estas investigaciones se deduce que no existe un coagulante o floculante universal, sino que son altamente dependientes del tipo de agua residual a tratar. De hecho, de un mismo coagulante pueden requerirse en dosis muy distintas en función del tipo del agua a tratar. (Ordóñez, 2011).

- **Flotación por aire disuelto (*DAF*)**

Esta tecnología es empleada en diversos procesos y rubros, desde la minería hasta la industria del papel, y el tratamiento de aguas no es la excepción. En este contexto, es utilizada para remover contaminantes del agua a tratar, que se encuentren como solidos suspendidos o en fase líquida.

Este proceso tiene lugar en un estanque o celda de flotación y se realiza mediante la introducción de finas burbujas por la parte inferior del estanque, el cual cuenta con un agitador en la parte baja (comúnmente una hélice impulsada por un motor eléctrico) con el fin de dar dinamismo a la solución acuosa y dividir las burbujas de aire que ingresan a este lo más posible. (Rojas & Bullon, 2007).

El objetivo de estas pequeñas es “capturar” los contaminantes que se desean remover de la solución acuosa, para llevarlos a la superficie del estanque y facilitar la extracción de estos. Es común, añadirle a esta solución acuosa, agentes químicos que faciliten la adhesión de los contaminantes (que se buscan remover) a las burbujas, con fin de que el proceso sea más eficiente.

Existen diversos tipos de diseño de celdas de flotación, cada una con características especiales que buscan maximizar la eficiencia del equipo según el proceso y compuestos que se buscan remover. Sin embargo, el principio de funcionamiento es similar al descrito anteriormente. En la siguiente figura se expone una celda de flotación de aire disuelto comúnmente utilizada en el proceso de tratamiento de efluentes.

Figura 15: Celda de flotación empleada en el tratamiento de efluentes.

- **Filtración por membranas**

La filtración por membranas consiste en instalar una barrera selectiva (membrana porosa) entre dos disoluciones, de manera que aplicando una fuerza impulsora (presión) en uno de los lados de la membrana los componentes sean transportados hacia su superficie, donde algunos de ellos la atravesarán y otros serán retenidos. Como consecuencia de esto, se generan dos corrientes, una menos concentrada llamada permeado y otra más concentrada llamada rechazo o concentrado. (Ordóñez, 2011).

Las técnicas de filtración por membranas pueden clasificarse en base a la naturaleza de la fuerza impulsora aplicada o al tamaño de los poros filtrantes. La microfiltración (*MF*) y la ultrafiltración (*UF*) operan tanto a presión como a vacío, independientemente de la presión osmótica de la corriente de alimentación. En el caso de la nanofiltración (*NF*) y ósmosis inversa (*OI*), aunque se opera también a presión, se requiere superar la presión osmótica de la disolución de alimentación. (Ordóñez, 2011).

La *MF* permite separar partículas entre $0{,}1\ y\ 10\ [\mu m]$, operando a presiones entre $0{,}1\ y\ 2{,}0\ [bar]$. Por su parte, la *UF* se aplica cuando los componentes a separar son macromoléculas o partículas submicrométricas, es decir, aquellas sustancias en el intervalo $0{,}002\ y\ 0{,}1\ [\mu m]$, y por lo general, las presiones de operación varían entre $0{,}1\ y\ 5{,}0\ [bar]$. En el caso de la *OI*, a la separación de todas las partículas anteriores se añaden compuestos de bajo peso molecular como es el caso de iones monovalentes (ej. $Na^+, K^+, Cl^-, NO_3{}^-$) o azúcares. Sin embargo, las presiones a aplicar son bastante mayores, variando entre $5{,}0\ y\ 120\ [bar]$. Finalmente se tiene la *NF*, esta es similar a la *OI* pero las membranas que se emplean en este tipo de filtración son más permeables, encontrándose entre los $0{,}0005\ y\ 0{,}002\ [\mu m]$, de manera que no tienen la capacidad de separar iones monovalentes en gran medida, pero a diferencia de la *OI*,

en la *NF* se requiere menos presión para la separación de los componentes, entre 3,0 y 20,0 $[bar]$. Cabe mencionar que la *NF* se presenta como una alternativa bastante útil para la separación de microcontraminantes, herbicidas e iones divalentes (por ejemplo $Ca^{2+}, Mg^{2+}, {SO_4}^{2-}, {CO_3}^{2-}$). (Ordóñez, 2011).

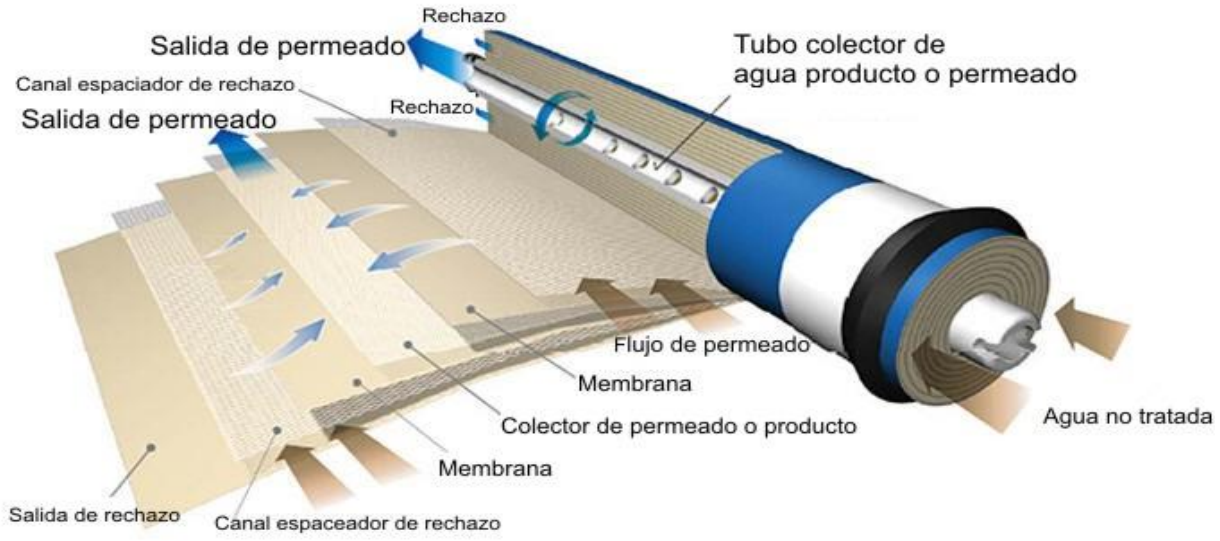


Figura 16: Filtración por membrana de flujo cruzado de tipo dentro-fuera. Fuente: Aquapurif.

Dentro de los sistemas de membranas, el ensuciamiento de estas, es un punto de vital importancia en la operación de este tipo de tecnologías. Así, las causas por las que se produce el ensuciamiento de las membranas son diversas, como: acumulación de sólidos en suspensión, de coloides, de materia orgánica, de sustancias poliméricas extracelulares (SPE), de microorganismos o por incrustaciones de sales. Cabe destacar que el factor más importante a considerar para evitar tanto el ensuciamiento inorgánico como el biológico es la rugosidad de la superficie de la membrana. Las hendiduras o irregularidades son lugares susceptibles al depósito de sustancias y al crecimiento de depósitos. (Ordóñez, 2011).

El ensuciamiento de las membranas conlleva: (Al-Ahmad, Abdul Aleem, Mutiri, & Ubaisy, 2000). disminución progresiva del caudal de permeado, aumento progresivo de la presión transmembrana, mayores requerimientos energéticos, degradación de las membranas, y mayor paso de sales.

Así, en base a esta realidad, el mantenimiento de los sistemas de membrana es de gran importancia al momento de trabajar con este tipo de tecnologías. Buscando contar con sistema de elevada confiabilidad, el cual responda a las necesidades de calidad y demanda de caudal, requerido por el proceso productivo.

En la sección de anexo se detalla más información sobre las distintas tecnologías de membrana.

1.4.2.2. Procesos Biológicos

Este tipo de tecnología emplea microrganismos para degradar la materia orgánica presente en los efluentes de origen industrial y municipal. La materia orgánica entrega los nutrientes necesarios para el crecimiento y mantención de poblaciones microbianas. Estas, al realizar su proceso metabólico, consumen reactantes (insumos) y liberan productos, los cuales dependerán de la naturaleza del efluente y del tipo de bacteria utilizada, respectivamente. El hecho de que las bacterias degraden la materia orgánica, contribuye a que el proceso de tratamiento de efluentes se encuentre dentro de los niveles aceptables respecto a los parámetros de muestreo establecidos por la normativa ambiental. Donde, se tiene que, el principal parámetro de control de estos sistemas y al mismo tiempo se busca reducir es el DBO_5, el cual relaciona la cantidad de oxigeno requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica proveniente de la fuente generadora. (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

Los procesos biológicos se pueden clasificar en base al metabolismo empleado por las poblaciones de bacterias para degradar la materia orgánica, existiendo los procesos anaerobios y los procesos aerobios. En los primeros (procesos anaerobios) las bacterias no requieren oxígeno para desarrollar su proceso metabólico y con esto degradar la materia orgánica. Se tiene que los principales productos que se generan a partir del metabolismo anaerobio es biomasa y biogás, compuesto metano (CH_4) en un 60% y de dióxido de carbono (CO_2) en un 35%, donde el primero se puede utilizar como fuente energética. Por otra parte, el proceso de metabolismo aerobio requiere oxígeno y una fuente de nutrientes para desarrollarse. Los principales productos generados a partir de este proceso son; biomasa, dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O). (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

En la sección de anexo se detallan las diferentes tecnologías utilizadas por los procesos bilógicos, tanto para sistemas aerobios como anaerobios.

1.4.2.3. Procesos Químicos

Estos procesos buscan modificar la estructura química de los compuestos contaminantes, con el fin de acondicionarlos para disminuir su toxicidad y comportamiento refractario (compleja degradación), para facilitar su degradación. Esto, debido a que muchos de los efluentes de origen industrial presentan una alta cantidad de materia orgánica disuelta de difícil degradación, que en muchas ocasiones es de naturaleza recalcitrante (presenta alta resistencia a la biodegradación) por ser moléculas complejas e incluso toxicas para los microrganismos empleados en los tratamientos biológicos. (Almeida, Assaline, & Rosa, 2004).

En base a esta necesidad, surgen tecnologías en el tratamiento de efluentes industriales que buscan una mayor eficiencia y efectividad a nivel del proceso de tratamiento y remoción de contaminantes, esto con el fin de cumplir con los valores límites exigidos por la legislación ambiental, la cual cada vez más es más exigente.

- **Procesos de Oxidación Avanzada**

Entre las tecnologías más promisorias se encuentran los denominados procesos oxidativos avanzados (POA). Los POA se basan en la generación de radicales hidroxilos (OH•). Esta especie es altamente oxidante y no selectiva que puede promover la degradación de varios compuestos contaminantes en pocos minutos. (Huang, Dong, & Tang, 1993).

Los radicales OH• pueden modificar la estructura química de compuestos orgánicos recalcitrantes convirtiéndolos en compuestos más simples, de menor masa molecular, menos tóxicos a los microorganismos y, consecuentemente, más biodegradables. (Marco, Esplugas, & Saum, 1997).

La remoción de color, parámetro de difícil reducción por tratamientos convencionales, se consigue aplicando esta tecnología. Las macromoléculas orgánicas, tales como los polímeros solubles, poseen grandes dimensiones para penetrar en las paredes de las células, razón que impide la oxidación biológica de estos compuestos. Así, el tratamiento químico puede oxidar y quebrar estas grandes moléculas orgánicas, convirtiéndolas en compuestos intermediarios menores (cadenas pequeñas de ácidos orgánicos), que son capaces de penetrar en las células y ser fáciles de biodegradar. (Marco, Esplugas, & Saum, 1997). La velocidad de oxidación biológica generalmente se aumenta en función de la disminución del tamaño molecular de los compuestos. Algunos trabajos han mostrado que diferentes POA pueden oxidar parcialmente varios tipos de compuestos refractarios, aumentando la relación DBO_5/DQO y/o la tasa de utilización de oxígeno propiciando, consecuentemente, un mejor tratamiento biológico de los efluentes. (Momenti, 2006).

Dentro de los procesos de oxidación avanzada existen dos clases; los homogéneos, los cuales utilizan un catalizador y un substrato en una única fase y los heterogéneos, que emplean un catalizador y un substrato en estado sólido y líquido. (Teixeira, 2002). En la sección de anexo se detallan los POA homogéneos comúnmente utilizados, específicamente:

- ✓ Utilización de ozono y su combinación con radiación ultra violeta
- ✓ Utilización de peróxido de hidrógeno y su combinación con radiación ultra violeta

- **Electroquímicos**

Los procesos electroquímicos, utilizados en el tratamiento de aguas, emplean electricidad para producir una reacción química destinada a la eliminación o destrucción de los contaminantes presentes en las aguas a tratar. Básicamente, el sistema electroquímico está formado por un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo, donde tiene lugar la reducción y una fuente de corriente continua encargada de suministras la electricidad. Los parámetros claves a la hora de aplicar un proceso de este tipo son; el diseño del reactor, la naturaleza de los electrodos y diferencia de potencial y/o corriente de trabajo. (Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables, 2010).

Las reacciones electroquímicas son las de reducción oxidación conocidas como redox, las cuales se basan en transferencia de electrones entre un conjunto de especies químicas, en las cuales se presentará una especie oxidante y una reductora, que a su vez alcanzaran una forma reducida y una forma oxidada respectivamente. Según lo anterior para que se lleve a cabo este tipo de reacciones debe haber una especie que ceda sus electrones y otra que los acepte. El reductor es la especie química que tiende a ceder electrones de su estructura química al medio, quedando con carga mayor a la que tenía, mientras, el oxidante es la especie que tiende a captar esos electrones, quedando con carga menor. (Hurley & Masterton, 1997).

Si en una solución de un electrolito o un compuesto ionizable, se instalan un par de electrodos y una fuente de corriente directa se conecta entre ellos, los iones positivos se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia los positivos (oxidarse o reducirse) y se transforman en moléculas o átomos neutros. (Hurley & Masterton, 1997).

Por lo tanto, en las reacciones electroquímicas se da básicamente, un intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución, mediante la aplicación de una diferencia de potencial, que genera una corriente donde los electrones fluyen desde el punto más negativo hasta el más positivo. Este tipo de reacciones se clasifican según el lugar donde ocurran, ya sea en el seno de la solución, que son las llamadas homogéneas o en la superficie del electrodo, llamadas heterogéneas. (Hurley & Masterton, 1997).

En esta línea, la electrocoagulación es un método electroquímico usado para el tratamiento de aguas residuales que ha sido utilizado para remover un amplio número de contaminantes. Este proceso que implica varios fenómenos químicos y físicos, en donde usa electrodos para proveer iones al agua residual que se desea tratar. (Mollah, y otros, 2004). En esta técnica el coagulante es generado “in situ” debido a una reacción de oxidación del ánodo y las especies cargadas o metales pesados pueden ser removidos del efluente debido a la reacción entre iones con carga opuesta o debido a la formación de flóculos de hidróxidos metálicos. (Mollah, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

La electrocoagulación implica varias etapas: (Mollah, y otros, 2004) (i) Debido a la oxidación del electrodo se presenta la formación de coágulos. (ii) Desestabilización del contaminante, partículas en suspensión y rompimiento de emulsiones. (iii) Para lograr la formación de flóculos se agrega partículas desestabilizadas. (iv) Remoción del material contaminante por flotación y sedimentación.

En esta técnica cuando un potencial es aplicado a los electrodos, los cuales son hechos de diferentes metales, especialmente hierro y aluminio, se genera el siguiente proceso: El hierro o aluminio del ánodo se disuelve dando origen a iones metálicos, los cuales son hidrolizados inmediatamente para formar hidróxidos o polihidróxidos, estas sustancias son excelentes agentes coagulantes. La coagulación ocurre cuando estos cationes (hidróxidos y polihidróxidos) son atraídos por las partículas negativas presentes en la solución. Los contaminantes presentes en el agua residual son tratados por medio de reacciones químicas y precipitación o combinación con

material coloidal, para después ser removidos por electroflotación, sedimentación o filtración. (Mollah, y otros, 2004).

1.5. Implementación de ciclo cerrado en las industrias de celulosa y papel

Dentro de las Mejores Tecnologías Disponibles (MDT), más conocidas como *Best Available Technology* (BAT), en las industrias de celulosa y papel, destaca la implementación de sistemas y tecnologías que buscan optimizar el consumo global del recurso hídrico por tonelada producida, ya sea de pasta de celulosa o de papel (considerando todos sus derivados). (IPPC, 2006).

En la presente sección se exponen diversas técnicas utilizadas con el objetivo de optimizar la gestión del recurso hídrico, junto a casos en el mundo de plantas que operan bajo un ciclo cerrado de sus aguas.

1.5.1. Técnicas para la optimización del uso del recurso hídrico

A continuación, se exponen alternativas consideras MTD, que buscan optimizar la gestión sobre las aguas en las plantas de producción de celulosa y papel.

- Procesos de lavado eficientes que operen bajo circuito cerrado de aguas.
- Recogida y reutilización de aguas limpias del proceso de refrigeración.
- Separación efectiva de circuitos de agua, segmentando aguas en base a su grado de contaminación, y con esto someterlas a procesos de reciclado más eficientes.
- Optimización en la gestión del agua, empleando tratamientos de clarificación por sedimentación, técnicas de flotación y filtración, para reutilizarlas en el mismo proceso productivo.
- Sistemas de tratamiento de aguas internos por circuito.
- Reciclado parcial de los efluentes sometidos a procesos biológicos mediante la implementación de tratamientos avanzados que logren la “calidad” de agua requerida por el proceso productivo.
- Contar con un sistema equilibrado de almacenamiento de aguas.
- Contar con equipos o máquinas de consumo reducido de agua.

Mediante la implementación de algunas de las alternativas expuestas anteriormente, en conjunto con procesos que empleen productos menos contaminantes y dañinos para el medio ambiente (principalmente en el proceso de blanqueo, a partir del uso de tecnologías ECF y principalmente TFC), diversas fábricas de pasta y papel han logrado un importante porcentaje de cerrado en sus circuitos de aguas. Permitiendo, de esta manera, reutilizar el recurso hídrico en su

propio proceso productivo, disminuyendo considerablemente el consumo de agua fresca y, en consecuencia, el de efluentes (de alta carga contaminante por lo demás) liberados a los cuerpos receptores, por tonelada producida. (Greenpeace, 2006).

1.5.2.Casos en el mundo

Algunas de las plantas de celulosa y papel, que han implementado circuitos cerrados, se exponen a continuación. (Greenpeace, 2006).

- **SCA Pulp AB - Östrand, Suecia**

La empresa forestal sueca SCA ha conseguido cerrar el circuito del blanqueo en un 95% en su nueva planta de pulpa Kraft TCF de Östrand. La planta de blanqueo fue inaugurada en 1995 y fue desarrollada por Sunds y con la empresa norteamericana Union Camp. El proceso utiliza peróxido, oxígeno y ozono. Cuanto menos peróxido se utiliza menor es el costo del proceso. Los productos fabricados usualmente tienen las siguientes propiedades: brillo 80 al 90% ISO y una resistencia y limpieza similar a las pulpas ECF. De acuerdo al director de Producción, Ingela Ekebro, la pulpa TCF tiene las mismas cualidades y costos que las ECF.

El proceso ha disminuido el flujo de efluentes de $45\ a\ 5\ m^3/\ t$ pulpa. El proceso de blanqueo actualmente está ahora cerrado en un 95%. Los AOX han bajado a cero y la DQO ha descendido de $65\ kg/t$ pulpa a $40\ kg/t$ pulpa. Si se compara la nueva línea TCF con la vieja línea ECF, se ha producido un ahorro en el consumo de agua del 75%, la carga de AOX fue eliminada, las sustancias bioacumulativas fueron reducidas en un 99,2%, los productos de la madera en las descargas disminuyeron en un 72% y la DQO en un 49%. Los equipos para tratamiento de efluentes han sido instalados recientemente y la planta está trabajando para mejorar el rendimiento del tratamiento con la expectativa de que la descarga de DQO llegue a ser inferior a $10\ kg/ADt$. Esto representaría una reducción de alrededor del 80% en comparación a la vieja planta ECF. La capacidad de producción de la planta TCF es de 370.000 toneladas de pulpa Kraft de madera.

- **Samoa Pacific Cellulose – Samoa, California, Estados Unidos**

Samoa Pacific Cellulose es la propietaria de una planta de blanqueo de pulpa Kraft en Samoa, California. La planta de Samoa produce pulpa TCF, blanqueada con peróxido de hidrogeno y oxígeno. Extraer la lignina con oxígeno, recuperar los productos químicos agregados de las aguas de desecho y reciclar las aguas de desecho ha generado muchos beneficios que se sintetizan a continuación:

- ✓ Reducción de los efluentes de la planta de blanqueo en un 71%, de $45\ a\ 13\ m^3/ADt$
- ✓ Reducción del uso de agua en el blanqueo en un 50%, de $44\ a\ 22\ m^3/ADt$
- ✓ Reducir el uso de agua en el proceso de la planta en un 31%, de $75\ a\ 52\ m^3/ADt$

- ✓ Reducción del uso de vapor de la planta de blanqueo en un 17%, a 2,47 $GJ\ /ADt$
- ✓ Mejorar la claridad de las aguas de desecho.
- ✓ Eliminación de la descarga de organoclorados al océano, reduciendo el riesgo para la vida marina y bañistas.
- ✓ Reducción del olor en la planta, reduciendo el promedio mensual de quejas por olor ante la AQMD (Distrito de Administración de la Calidad del Aire) de 116 en 1990 a 48 en 1995.

- **Metsä-Botnia - Rauma, Finlandia**

La planta Metsä-Botnia de Rauma, Finlandia (antes conocida como Metsä- Rauma) es una planta que produce 570.000 $ADt/año$ de pulpa de madera blanda. Está ubicada en el sur de Finlandia y empezó sus operaciones en 1996. La inversión informada fue de US$ 700 millones. La planta fue construida específicamente para fabricar pulpa Kraft con el método TCF para ser usada con producción de papel integrada y para vender como pulpa de mercado. Se esperaba que la secuencia TCF ofreciera ventajas tanto al mercado como que en la reducción del flujo de efluentes en la planta de blanqueo.

Los efluentes de la planta son tratados con las aguas de desecho de la planta de papel adyacente UPM-Kymmene en una planta de tratamiento biológico de lodo activado.

Los dueños originales de la planta Rauma indicaron que la inversión y los costos operativos fueron más bajos en esta planta con método TCF que con el sistema ECF. La decisión de usar ozono de consistencia media se basó en una menor inversión y en las experiencias positivas de la planta Metsä-Botnia Kaskinen.

Rauma puede verse como la primera de una nueva generación de plantas construidas para el método TCF y para el cierre del circuito del sistema de agua.

- **MoDo - Husum, Suecia**

En la planta MoDo de Husum, el sistema de blanqueo en la línea de pulpa de abedul logró un cierre del circuito del 100%, pero sólo durante unas semanas. A fines de los años '90, ésta fue una planta para investigar el tema del cierre del circuito de los efluentes de blanqueo ECF. Se invirtió mucho tiempo y dinero. Hoy en día esta investigación ha sido abandonada. Surgieron demasiados problemas que fueron imposibles de solucionar. Desde el punto de vista de los ingenieros, parece posible cerrar el circuito de una planta de blanqueo ECF. Pero en la realidad, es mucho más complicado de lo que se dice y los costos son muy altos. Dado que los compuestos clorados son corrosivos y deben ser separados antes de cerrar el circuito.

En base a lo anterior, es posible observar que el tipo de tecnología empleada en el proceso de blanqueado, es fundamental al momento de decidir sí operar bajo ciclo cerrado o no. Así, las

plantas que poseen proceso de blanqueo a partir de TCF son más aptas para implementar ciclo cerrado en cuanto a la reutilización de aguas que sus pares ECF.

En cuanto a las platas de fibra recuperada, se tiene que también es posible implementar sistemas de ciclo cerrado. Ahora bien, dependiendo el producto a fabricar, es que se tiene mayor factibilidad al momento de cerrar circuitos de agua. Por lo general, las plantas que fabrican pastas y productos que requieren un proceso de destintado y blanqueo (suponiendo que se realizara con compuestos clorados) presentan mayores complicaciones o procesos más exhaustivos para reciclar agua, y así, reutilizarla en propio proceso productivo, que las pastas y productos que no involucran este tipo de procesos. (IPPC, 2006).

- **Holmen Paper – Madrid, España**

  Esta empresa en conjunto con Grupo de Investigación de Celulosa y Papel, perteneciente al departamento de Química de la Universidad Complutense de Madrid, han trabajado estos últimos años para implementar tecnologías de tratamiento de efluentes que permitan satisfacer la demanda de agua de la fábrica por medio de agua regenerada. Este proyecto consistió en estudiar el comportamiento de los efluentes, de la fábrica y de origen municipal, en base a distintas tecnologías de tratamiento, determinando cuales presentan mejores prestaciones para satisfacer la demanda y calidad de agua requerida por el proceso.

  Lo anterior, en conjunto con una buena separación de los circuitos de agua permitió disminuir el consumo global de agua de 13,5 $\left[m^3/_t\right]$ a 7 $\left[m^3/_t\right]$, lo que significa prácticamente una reducción de prácticamente un 50% del consumo de recurso hídrico y una disminución importante en volumen de los efluentes liberados al cuerpo receptor. (Ordóñez, 2011).

CAPÍTULO 2:

2. Metodología de Trabajo

2.1. Definición del Proyecto

El presente proyecto consiste en una propuesta de mejora tecnológica en el proceso de elaboración de pasta papelera, a partir de fibra recuperada (reciclada), para la producción de papeles y cartones de embalaje. Esta, se basa en la implementación de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas, que busca disminuir el consumo especifico del recurso hídrico por tonelada producto fabricado. Para el desarrollo del proyecto se utilizan herramientas de mejoramiento continuo, las cuales facilitan el análisis, selección y combinación de alternativas tecnológicas, que se adecuen a las necesidades y los requerimientos del proceso. Además, se persigue mantener intacta la calidad productos comercializados, darles valor agregado y potenciar la marca, ya que su elaboración se enmarca en procesos sustentables que se alinean con la preservación del entorno y medioambiente.

2.1.1. Enunciado de oportunidad

La industria de celulosa y papel es uno de los sectores productivos más relevantes de la economía chilena, aportando el 1,05 % de PIB nacional para el año 2016. (Banco Central de Chile, 2016). Este sector económico emplea grandes cantidades de recursos en la elaboración de sus diferentes productos, destacando el amplio consumo de fibra maderera, energía y agua. Específicamente, el consumo energético, por parte de la industria de celulosa y papel, alcanza el 35% del total del sector industrial a nivel nacional (Ministerio de Energía, 2017) y, con respecto al recurso hídrico, la demanda de este, alcanza el 30% del total del uso industrial del agua en Chile. (Peña, Luraschi, & Valenzuela, 2004). Esto conlleva a que cualquier proyecto de mejora, que busque disminuir la demanda de estos recursos, sea una interesante alternativa de inversión, por lo que significa a nivel económico y ambiental.

Por otra parte, el amplio consumo de agua, por parte de estas industrias, se traduce en un gran volumen de efluentes liberados a los cuerpos receptores (alcantarillados y aguas superficiales) con una alta carga contaminante. Los efluentes emitidos por las fábricas de celulosa y papel se caracterizan por presentar altos contenidos de materia orgánica (medida en DBO_5 y DQO), de solidos suspendidos totales y sedimentables, de nutrientes (nitrógeno y fósforo), niveles extremos de pH y compuestos tóxicos y de difícil degradación natural. (IPPC, 2006).

Lo anterior, trae como consecuencia la necesidad, por parte de las organizaciones, de optimizar la gestión sobre el recurso hídrico y sus efluentes. Esto, mediante sistemas de tratamiento de aguas que se adecuen a los requerimientos de calidad del proceso, con el fin que permitan reutilizar el agua en la propia cadena de valor productiva. Operar bajo un ciclo cerrado de aguas, significa una disminución considerable en cuanto al consumo específico de agua por tonelada producida, junto

con un menor volumen de carga contaminante liberado al medio ambiente. De esta manera, la organización presentará ciclo productivo más sustentable y les dará valor agregado a sus productos comercializables.

2.1.2.Caso de Negocio

Mediante la implementación de un modelo de selección y combinación de alternativas tecnologías, que se adecuen a las necesidades establecidas y los requerimientos técnicos del proceso, se facilita la operación en base a un ciclo cerrado, en cuanto a las aguas utilizadas en proceso productivo. En donde se espera que, el consumo especifico de agua fresca por tonelada de producto elaborado, de la línea específica de papeles y cartones de embalaje, la cual tiene lugar en una fábrica integrada de pasta y papel en base a fibra recuperada, disminuya al menos en un 50%. Manteniendo constante la calidad de los productos comercializados. Cabe mencionar que este hecho tiene una consecuencia directa en el volumen de efluentes vertidos a los cuerpos receptores, los cuales también disminuirán.

2.1.3. Alcance del proyecto

La implementación del modelo de mejora tecnológica en el sistema de tratamiento y reutilización de aguas, se enfoca en el proceso de producción de papeles y cartones de embalaje a partir de fibras recuperadas, como testliner y papel ondulado. Donde la elaboración de pasta para este tipo de productos no involucra ningún proceso de destintado ni de blanqueo. Como línea base para el dimensionamiento del proceso, se considera una planta que produce $750[ADt/día]$ de estos productos.

Cabe mencionar que, si bien los procesos de fabricación de pasta a partir de fibra recuperada presentan bloques principales comunes, existen diferencias entre sí, al utilizar distintas composiciones en lo que respecta a materia prima y a procesos específicos, para la fabricación de los diferentes productos. En base a esto, se tiene un impacto variable en cuanto a la demanda de energía y agua fresca, como también a los efluentes y residuos generados. Así, el presente proyecto, sólo se acota a los productos antes mencionados.

Las áreas de interés en el proyecto de reutilización del recurso hídrico son:

- ✓ **Operaciones:** Evaluar e informar el desempeño de los procesos de producción de papel y de regeneración de aguas.
- ✓ **Calidad:** Controlar y asegurar la calidad del agua regenerada y de los productos fabricados en base a esta.
- ✓ **Entorno y Medio Ambiente:** Medir y controlar el volumen de consumo de agua fresca y de emisión de efluentes en los ciclos de producción.

- ✓ **Mantenimiento:** Idear una estrategia de mantenimiento que facilite el correcto funcionamiento del proceso de producción en base a agua regenerada, a modo de lograr una confiabilidad aceptable y alineada con el negocio.
- ✓ **Marketing:** Incentivar a los consumidores a preferir este producto con "sello verde", debido a la sustentabilidad ambiental en la producción de este, por sobre los ofrecidos por la competencia.

2.1.4. Indicadores

Como métrica primaria y medidor de éxito del proyecto se tiene:

> **Y:** Disminuir al menos el 50% del consumo específico de agua fresca por tonelada producida, mediante un sistema eficiente de reutilización aguas, manteniendo la calidad de los productos fabricados.

Las métricas secundarias son:

> **X_1:** Calidad de aguas regeneradas.
>
> **X_2:** Disponibilidad del sistema de tratamiento y reutilización de aguas.
>
> **X_3:** Tecnologías y su desempeño en el sistema.
>
> **X_4**: Costos involucrados.
>
> **X_5:** Salud, seguridad, medio ambiente y comunidad (HSEC)

2.2. Establecimiento y cuantificación de necesidades

Para desarrollar la propuesta tecnológica, lo primero es establecer las necesidades que posee un sistema de tratamiento de aguas residuales, para su posterior reutilización en el proceso de elaboración de papeles y cartones de embalaje.

A partir de un brainstorming (tormenta de ideas), se genera un listado de atributos con los cuales se desea que cuente el sistema de reutilización de aguas, "escuchando la voz" del cliente. Este, se realiza con el apoyo del Grupo de Celulosa y Papel, del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Complutense de Madrid, en base a documentación especializada en este tipo de proyectos de mejora y experiencias previas de funcionamiento de sistemas.

2.2.1. Listado de atributos del sistema

Tabla 11:Listado de atributos del sistemas elaborado a partir de un brainstorming. Fuente: elaboración propia.

Lista de atributos del sistema
No afecte la elaboración de los productos comercializados.
Se realice seguimiento a las calidades de las diferentes aguas.
Cuente con tecnologías para realizar tareas de limpieza al sistema.
Presente alta disponibilidad operacional.
Las tecnologías de tratamiento sean eficaces en remover contaminantes.
Recolecte y suministre las diferentes aguas del proceso.
Posea un sistema homogenización y almacenamiento.
Posea una adecuada segregación y gestión de residuos originados por el proceso productivo.
El sistema esté capacitado para operar de manera continua.
La tecnología presente una vida útil ≥ 20 años en base a las condiciones de calidad de aguas.
OPEX < 1.000.000 [USD]
CAPEX < 6.000.000 [USD]
Sistema con baja probabilidad de falla funcional.
No utilice sustancias corrosivas que puedan dañar el sistema a largo plazo.

Presente bajos tiempos de mantenibilidad.
Se adapte a la variabilidad de las condiciones operacionales existentes (caudal y concentración de contaminantes).
Componentes y equipos diseñados con materiales que no reaccionen a las condiciones físicas de operación.
Sistema de emergencia (respaldo de agua fresca y vertimientos accidentales).
Capacitación de personal de operaciones y mantenimiento.
Caudal total de suministro de aguas regeneradas al sistema productivo ≥ 250 [m^3/horas].
Se cuantifique y monitoree las variables de desempeño e indicadores de interés del sistema.
Equipos con certificaciones.
Altos caudales de regeneración.
Sistema recuperación de sustancias.
No requiera grandes obras civiles ni espacios para operar.
Posea un bajo consumo energético.
Operación y mantenimiento de equipos sin necesidad de expertos.
La operación no presente riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores.
El proceso de tratamiento genere un bajo impacto en el entorno y medio ambiente.

2.2.2. Categorización de atributos

A continuación, se exponen tablas en donde se categorizan los atributos del sistema de reutilización de aguas, con el fin de facilitar el análisis de las necesidades que este posee. La primera, los categoriza en; objetivos, funciones y restricciones, mientras que, en la segunda, se clasifican los objetivos en base a las métricas secundarías, las cuales se ven influenciadas por dichos atributos.

2.2.2.1. Categorización en objetivos, funciones y restricciones.

Los objetivos, son atributos con los cuales se desea que cuente el sistema y facilitan la posterior selección de la alternativa que más se adecua a las necesidades del cliente. Por su parte, las funciones, son tareas básicas y elementales que debe desarrollar el sistema, donde el incumplimiento de cualquiera de estas genera una falla funcional en el sistema. En cuanto a las restricciones, se tiene que son atributos que deben ser considerados obligatoriamente al momento

de desarrollar la propuesta, ya que restringen la alternativa a diseñar. (Fundamentos de Diseño Mecánico UTFSM, 2014).

Tabla 12:Categorización de atributos en objetivos, funciones y restricciones. Fuente: elaboración propia.

Objetivos	***Funciones***	***Restricciones***
No afecte la elaboración de los productos comercializados.	*Las tecnologías de tratamiento sean eficaces en remover contaminantes.*	*El sistema esté capacitado para operar de manera continua.*
Se realice seguimiento a las calidades de las diferentes aguas.	*Recolecte y suministre las diferentes aguas del proceso.*	*La tecnología presente una vida útil ≥20 años en base a las condiciones de calidad de aguas.*
Cuente con tecnologías para realizar tareas de limpieza al sistema.	*Posea un sistema homogenización y almacenamiento.*	*OPEX < 1.000.000 [USD]*
Presente alta disponibilidad operacional.	-	*CAPEX < 6.000.000 [USD]*
Sistema con baja probabilidad de falla funcional.	-	*Componentes y equipos diseñados con materiales que no reaccionen a las condiciones físicas de operación.*
No utilice sustancias corrosivas que puedan dañar el sistema a largo plazo.	-	*Sistema de emergencia (respaldo de agua fresca y vertimientos accidentales).*
Presente bajos tiempos de mantenibilidad.	-	*Capacitación de personal de operaciones y mantenimiento.*
Se adapte a la variabilidad de las condiciones operacionales existentes (caudal y concentración de contaminantes).	-	*Caudal total de suministro de aguas regeneradas al sistema productivo ≥ 250 [m^3/horas].*
Se cuantifique y monitoree las variables de desempeño e indicadores de interés del sistema.	-	-
Equipos con certificaciones.	-	-
Altos caudales de regeneración.	-	-
Sistema recuperación de sustancias.	-	-

No requiera grandes obras civiles ni espacios para operar.	-	-
Posea un bajo consumo energético.	-	-
Operación y mantenimiento de equipos sin necesidad de expertos.	-	-
Posea una adecuada segregación y gestión de residuos originados por el proceso productivo.	-	
La operación no presente riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores.	-	-
El proceso de tratamiento genere un bajo impacto en el entorno y medio ambiente.	-	-

2.2.2.2. Categorización de objetivos en base a métricas secundarias.

En la siguiente tabla se exponen los objetivos deseables del sistema, categorizados según la métrica secundaría que es influenciada por cada uno de estos.

Tabla 13:Objetivos del sistema categorizados en base a las métricas secundarias. Fuente elaboración propia.

	Objetivos
X_1:Calidad de aguas regeneradas	*No afecte la elaboración de los productos comercializados.*
	Se realice seguimiento a las calidades de las diferentes aguas.
	Cuente con tecnologías para realizar tareas de limpieza.
X_2: Disponibilidad del sistema de tratamiento y reutilización	*Presente alta disponibilidad operacional.*
	Sistema con baja probabilidad de falla funcional.
	No utilice sustancias corrosivas que puedan dañar el sistema a largo plazo.
	Presente bajos tiempos de mantenibilidad.

X_3: Tecnologías y su desempeño en el sistema de regeneración	*Se adapte a la variabilidad de las condiciones operacionales existentes (caudal y concentración de contaminantes).*
	Se cuantifique y monitoree las variables de desempeño e indicadores de interés del sistema.
	Equipos con certificaciones
	Altos caudales de regeneración
X_4: Costos involucrados	*Sistema recuperación de sustancias.*
	No requiera grandes obras civiles ni espacios para operar.
	Posea un bajo consumo energético.
	Operación y mantenimiento de equipos sin necesidad de expertos.
X_5: HSEC	*La operación no presente riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores.*
	El proceso de tratamiento genere un bajo impacto en el entorno y medio ambiente.
	Posea una adecuada segregación y gestión de residuos originados por el proceso productivo.

2.2.3. Jerarquización de atributos por métricas

A continuación, se hace una jerarquización de los atributos que influyen en cada métrica, desde los más a los menos relevantes en cada categoría.

- **X_1:** *Calidad de aguas regeneradas.*

  1.1. No afecte la elaboración de los productos comercializados.
  1.2. Se realice seguimiento de las calidades de las diferentes aguas
  1.3. Cuente con tecnologías para realizar tareas de limpieza al sistema.

- **X_2:** *Disponibilidad de tecnologías de tratamiento y reutilización de aguas.*

  2.1. Presente una alta disponibilidad operacional.
  2.2. Sistema con baja probabilidad de falla funcional.
  2.3. No utilice sustancias corrosivas u otras contaminantes que puedan dañar al sistema a largo plazo.
  2.4. Presente tiempos bajos de mantenibilidad.

- **X_3:** *Tecnologías y su desempeño en el sistema de regeneración.*

  3.1. Se adapte a la variabilidad de las condiciones operacionales existentes (caudal y concentración de contaminantes).
  3.2. Altos caudales de regeneración.
  3.3. Se cuantifique y monitoree las variables de desempeño e indicadores de interés del sistema.
  3.4. Equipos con certificaciones

- **X_4:** *Costos involucrados.*

  4.1. No requiera grandes obras civiles ni espacios para operar
  4.2. Posea un bajo consumo energético.
  4.3. Operación y mantenimiento de equipos sin necesidad de expertos.
  4.4. Sistema recuperación de sustancias.

- **X_5**: *Salud, seguridad, medio ambiente y comunidad (HSEC).*

  5.1. La operación no presente riesgos en la seguridad y salud de los trabajadores.
  5.2. Posea una adecuada segregación y gestión de residuos originados por el proceso productivo.
  5.3. El proceso de tratamiento genere un bajo impacto en el entorno y medio ambiente.

2.2.4. Cuantificación de objetivos del sistema

Con el fin de cuantificar los diferentes objetivos deseados, se le entrega un determinado valor o "peso" en base a una escala de puntuación, considerando su importancia. Esto, permitirá darle un valor cuantificable a cada uno de los objetivos, facilitando posteriormente la selección de alternativas tecnológicas en base a las necesidades del proceso.

La cuantificación se realiza según la siguiente tabla, la cual le entrega un determinado valor según la importancia de cada atributo.

Tabla 14: Cuantificación según la importancia del atributo. Fuente: elaboración propia

Nada importante		*Algo Importante*		*Normal*	*Importante*		*Muy Importante*	
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*

Cabe mencionar que los puntos a repartir son limitados y equivalen a 6 veces la cantidad de atributos del sistema. Esto, se realiza con el fin de marcar la diferencia en cuanto a la importancia que presentan los diferentes atributos para el sistema de regeneración de aguas, impidiendo asignarle un valor de elevada importancia a todos los objetivos por igual y evitando, con esto, que se desvirtúe el problema a resolver.

Tabla 15: Cuantificación de atributos del sistema según importancia, considerando 1 como nada importante y 9 muy importante. Fuente: elaboración propia.

	Objetivos jerarquizados	***Importancia***
X_1: Calidad de aguas regeneradas	*No afecte la elaboración de los productos comercializados.*	***9***
	Se realice seguimiento a las calidades de las diferentes aguas.	***7***
	Cuente con tecnologías para realizar tareas de limpieza.	***6***
X_2: Disponibilidad del sistema de tratamiento y reutilización	*Presente alta disponibilidad operacional.*	***9***
	Sistema con baja probabilidad de falla funcional.	***7***
	No utilice sustancias corrosivas que puedan dañar el sistema a largo plazo.	***4***
	Presente bajos tiempos de mantenibilidad.	***3***
X_3: Tecnologías y su desempeño en el sistema de regeneración	*Se adapte a la variabilidad de las condiciones operacionales existentes (caudal y concentración de contaminantes).*	***9***
	Altos caudales de regeneración	***7***
	Se cuantifique y monitoree las variables de desempeño e indicadores de interés del sistema.	***6***
	Equipos con certificaciones	***4***
X_4: Costos involucrados	*No requiera grandes obras civiles ni espacios para operar.*	***6***
	Posea un bajo consumo energético.	***5***
	Operación y mantenimiento de equipos sin necesidad de expertos.	***4***
	Sistema recuperación de sustancias.	***3***
X_5: HSEC	*La operación no presente riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores.*	***9***
	Posea una adecuada segregación y gestión de residuos originados por el proceso productivo.	***6***
	El proceso de tratamiento genere un bajo impacto en el entorno y medio ambiente.	***4***

2.3. Situación actual y requerimientos técnicos del proceso

En la presente sección se establecen las principales características interés para el proyecto, respecto del proceso de producción de pasta para la fabricación de papeles y cartones de embalaje en base a un porcentaje mayoritario de fibra recuperada. Cabe mencionar que tanto el proceso de producción como los parámetros de las aguas dependerán de las tecnologías y materias primas empleadas en las distintas fábricas en particular, sin embargo, todas estas presentan "bloques básicos" comunes y valores similares en cuanto a los parámetros de interés por tonelada producida. (IPPC, 2006).

Con el fin de contar con una mirada global del proceso de fabricación de papeles y cartones de embalaje se diseña un diagrama SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer), en donde se detallan los proveedores de lo que requiere por el proceso, las entradas de materias primas e insumos, el proceso de producción como tal, las salidas que este genera y los clientes que tiene el dicho proceso de producción. Cabe mencionar que los clientes pueden ser tanto externos como internos, dependiendo de las salidas que genera el proceso productivo. Además, el diagrama SIPOC, permite identificar los diferentes afectados del proceso (también denominados stakeholders) los cuales deben ser considerados como elementos esenciales en la planificación estratégica del negocio. (Fundametos de Calidad UTFSM, 2015).

Por otra parte, se caracterizan los efluentes provenientes de proceso de preparación de pasta antes de ingresar a la máquina de papel. En esta fase del proceso las aguas adquieren el mayor grado de contaminación, debido a que es el primer contacto con la materia prima recuperada, la cual se caracteriza por poseer altos niveles de materia orgánica y otros componentes que deben ser removidos antes de la entrada a la máquina de papel. Por este motivo, la preparación consta de diversas etapas de limpieza, procesos son fundamentales para asegurar una adecuada calidad de los productos comercializados y evitar un deterioro acelerado o posibles fallos de componentes aguas abajo del proceso productivo. (IPPC, 2006).

Además, se estable un rango de valores de consumo especifico de agua fresca con el fin de contar con una línea base y poder cuantificar la disminución de dicho consumo mediante la presente propuesta de mejora.

Finalmente, se establecen los requerimientos técnicos del proceso, los cuales buscan dar respuesta a los objetivos propuestos y consideran tanto las funciones que debe desempeñar el proceso de tratamiento y reutilización de aguas como también las restricciones que posee este.

2.3.1. SIPOC de la fabricación de papeles y cartones de embalaje

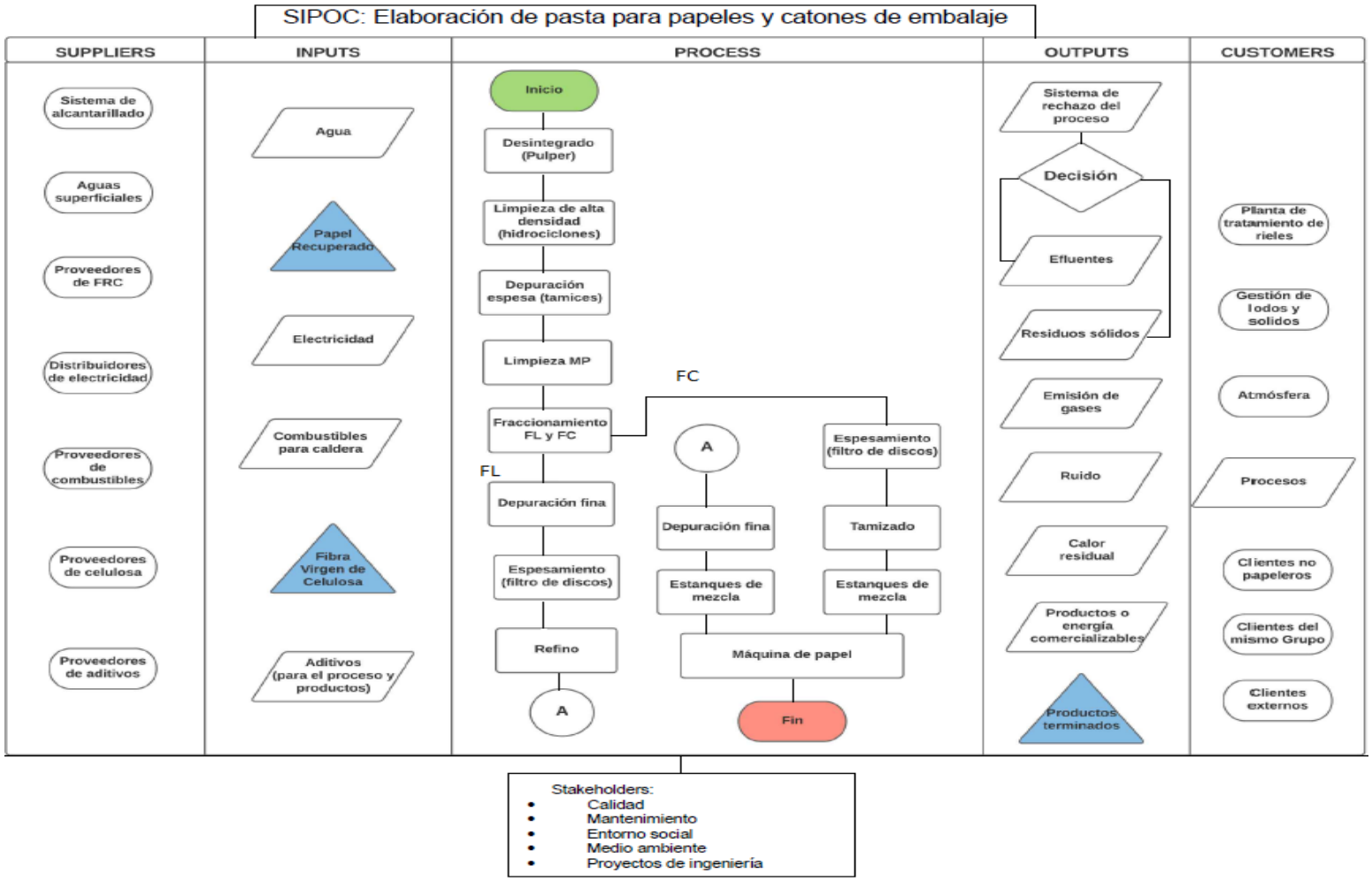


Figura 17: SIPOC del proceso de producción de papeles y cartones a partir de fibra recuperada, con (FC) fibra corta y (FL) fibra larga. Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Caracterización de efluentes y niveles de consumo de agua fresca en de elaboración de papeles y cartones de embalaje

A continuación, se expone una tabla donde se señalan los parámetros más importantes que caracterizan a los efluentes provenientes del proceso de preparación de pasta para cartones y papeles de embalaje. La presente información fue recopilada en base a la tesis doctoral "Tratamientos avanzados de regeneración de efluentes en la producción de papel" (Ordóñez, 2011).

Tabla 16:Caracterización de efluentes provenientes de un equipo de flotación de aire disuelto (FAD) que tiene lugar en el proceso de elaboración de pasta para papeles y cartones de embalaje. Fuente: Ordóñez, 2011.

Parámetros de Aguas	Valores mínimos	Valores promedios	Valores
pH	6,9	7,3	7,8
Temperatura [°C]	25,0	30,0	35,0
Conductividad [mS/cm]	1,8	2,8	3,9
DQO [mg/L]	1.500	2.600	3.500
DBO_5 [mg/L]	600	1.200	1.600
ST [mg/L]	4.800	5.400	5.800
SST [mg/L]	1.100	1.300	1.620
Turbidez [NTU]	500	650	690
Alcalinidad [mg$CaCO_3$/L]	790	850	900
Ca [mg/L]	56	106	145
SO_4 [mg/L]	360	495	720
SiO_2 [mg/L]	150	220	240
Cl [mg/L]	95	110	150
N total [mg/L]	0,5	4,8	9,7
P - PO_4 [mg/L]	0,01	0,6	1,0
Absorbancia a 254 [nm]	0,2	0,5	1,1
Redox [mV]	-390,0	-277,0	-61,0
Fe [mg/L]	0,1	2,2	22,0
Al [mg/L]	0,03	0,06	0,1
Mg [mg/L]	0,3	1,4	10,0

En cuanto a los niveles de consumo de agua fresca, se tiene que estos presentan variaciones dependiendo de la tecnología existente en el proceso productivo empleado en cada fábrica en particular y el producto a elaborar. Sin embargo, específicamente para papeles y cartones de embalaje sin estucar se presentan los siguientes valores. (IPPC, 2006).

Tabla 17: Rango de consumo de agua fresca en el proceso de producción de papeles y cartones de embalaje. Fuente: elaboración propia en base a consumo especifico de agua por producto IPPC, 2006 y producción 750 [$ADt/día$].

	Variable	Mínimo	Promedio	Máximo
Consumo de Agua Fresca	Volúmenes por producto [m^3/ADt]	5,5	8,5	13,4
	Volúmenes diarios [m^3/día]	4.125	6.375	10.050
	Caudales de utilización [m^3/h]	171,9	265,6	418,8

2.3.3. Especificaciones y requerimientos del proceso

A partir de una tormenta de ideas, se busca cómo satisfacer las necesidades del sistema establecidas anteriormente. Para lograr esto, se ofrecen alternativas técnicas (**Z**), las cuales a su vez consideran las características funcionales y restricciones del sistema, a los objetivos deseables de cada grupo de métricas (**X**) que influyen en el objetivo del proyecto (**Y**).

A continuación, se exponen los parámetros de calidad de agua fresca empleadas en la producción de papeles y cartones. Estos, no se detallan en la tabla de requerimientos, pero son considerados en el ítem "Parámetros técnicos de calidad de aguas".

Tabla 18:Parámetros de calidad de agua fresca empleada para la producción de papeles y cartones a partir de fibra recuperada. Fuente: Ordóñez, 2011.

Requerimientos Técnicos	Valores exigidos
pH	6,5-7,5
Temperatura [°C]	-
Conductividad [µS/cm]	<500
DQO total [mg/L]	<5
SST [mg/L]	<5
Ca [mg/L]	<60
SO_4 [mg/L]	<100
SiO_2 [mg/L]	<5
Cl [mg/L]	<50
Al [mg/L]	0,1
Fe [mg/L]	<0,1
Mn [mg/L]	< 0,05
Mg [mg/L]	<15
Cu [mg/L]	<0,001
Alcalinidad [mg$CaCO_3$/L]	<100
Turbidez [NTU]	-
SDT [mg/L]	<300
Color [unidades Pt - Co]	<30
Dureza [mg$CaCO_3$/L]	<200

Tabla 19: Requerimientos técnicos del sistema de regeneración de aguas. Fuente: elaboración propia.

	Requerimientos
Calidad de parámetros	*Parámetros técnicos de calidad de aguas (DQO, SST, conductividad pH, etc.)*
	Monitoreo de parámetros influyentes de calidad mediante cartas de control.
Sistema tecnológico	*Sistema de limpieza CIP (Cleaning In Place)*
	Diseñar una configuración funcional del sistema, buscando una alta confiabilidad.
	Componentes y equipos diseñados con materiales que no reaccionen a las condiciones físicas de operación.
	La tecnología presente una vida útil ≥20 años en base a las condiciones de calidad de aguas.
	Las tecnologías de tratamiento sean eficaces en remover contaminantes.
	Recolecte y suministre las diferentes aguas del proceso.
	Posea un sistema homogenización y almacenamiento.
	Implementación de Mejores Técnicas Disponibles (MTD).
	El sistema esté capacitado para operar de manera continua.
	Caudal total de suministro de aguas regeneradas al sistema productivo ≥ 250 [m^3/horas].
	Sistema de emergencia (respaldo de agua fresca y vertimientos accidentales).
Costos	*CAPEX < 6.000.000 [USD]*
	OPEX < 1.000.000 [USD/año]
Estrategias	*Implementar una estrategia y plan de mantenimiento en base a un AMEF para equipos críticos, alineado con el mantenimiento al menor costo global.*
	Implementar 5S para facilitar las tareas de mantenimiento e identificación oportunidades de mejora.
	Sistema de información, medición y control en base a KPI´S, que levante oportunidades de mejora.
	Capacitación de personal de operaciones y mantenimiento.
	Gestión sobre componentes e insumos críticos del sistema de tratamiento.

2.4. Análisis de información

Con el objetivo de facilitar el diseño de la propuesta de mejora tecnológica, es que se utilizan diversas herramientas de mejoramiento continuo y análisis de problemas. Así, en el presente proyecto se utilizan las siguientes:

- Árbol de funciones.
- Diagrama de relaciones (QFD).
- Búsqueda de alternativas tecnologías (Benchmarking).
- Tormenta de ideas (Brainstorming).
- Generación de alternativas de diseño.

Cada una de estas herramientas tiene un objetivo en particular dentro del análisis del proyecto. Sin embargo, estas se complementan entre sí, permitiendo abordar cada uno de los ápices de este y, de este modo, establecer los pilares para el diseño técnico de la propuesta tecnológica.

2.4.1. Árbol de funciones

El árbol de funciones, permite establecer la estructura funcional del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Estos, se basan en los objetivos funcionales establecidos en la categorización de atributos proyecto, los cuales son:

- *"Las tecnologías de tratamiento sean eficaces en remover contaminantes."*
- *"Recolecte y suministre las diferentes aguas del proceso."*
- "*Posea un sistema homogenización y almacenamiento."*

Estas, son las funciones principales que debe desempeñar el sistema de regeneración de aguas, por lo tanto, si cualquiera de estas presenta una falla, el sistema entra en un estado de falla funcional[1]. Así, tanto el diseño del sistema, como también las estrategias que se adopten una vez realizada la puesta en marcha del proyecto, deben velar por evitar o disminuir la probabilidad de que cualquiera de estos sistemas presente uno o múltiples modos de falla[2], ya que de ser así el sistema entra en estado de falla funcional.

A su vez, las funciones principales se descomponen en sub-funciones o sistemas secundarios que facilitan el cumplimiento de la función primaria requerida. El árbol de funciones del sistema de regeneración se expone a continuación.

[1] Falla Funcional: Esta se produce cuando el sistema o componente no puede cumplir de manera parcial o total la función para la cual fue adquirido. (Pistarelli, 2010).
[2] Modo de falla: Posibles causas que originan la pérdida de la función, en base a un proceso de degradación conocido o aleatorio. (Pistarelli, 2010).

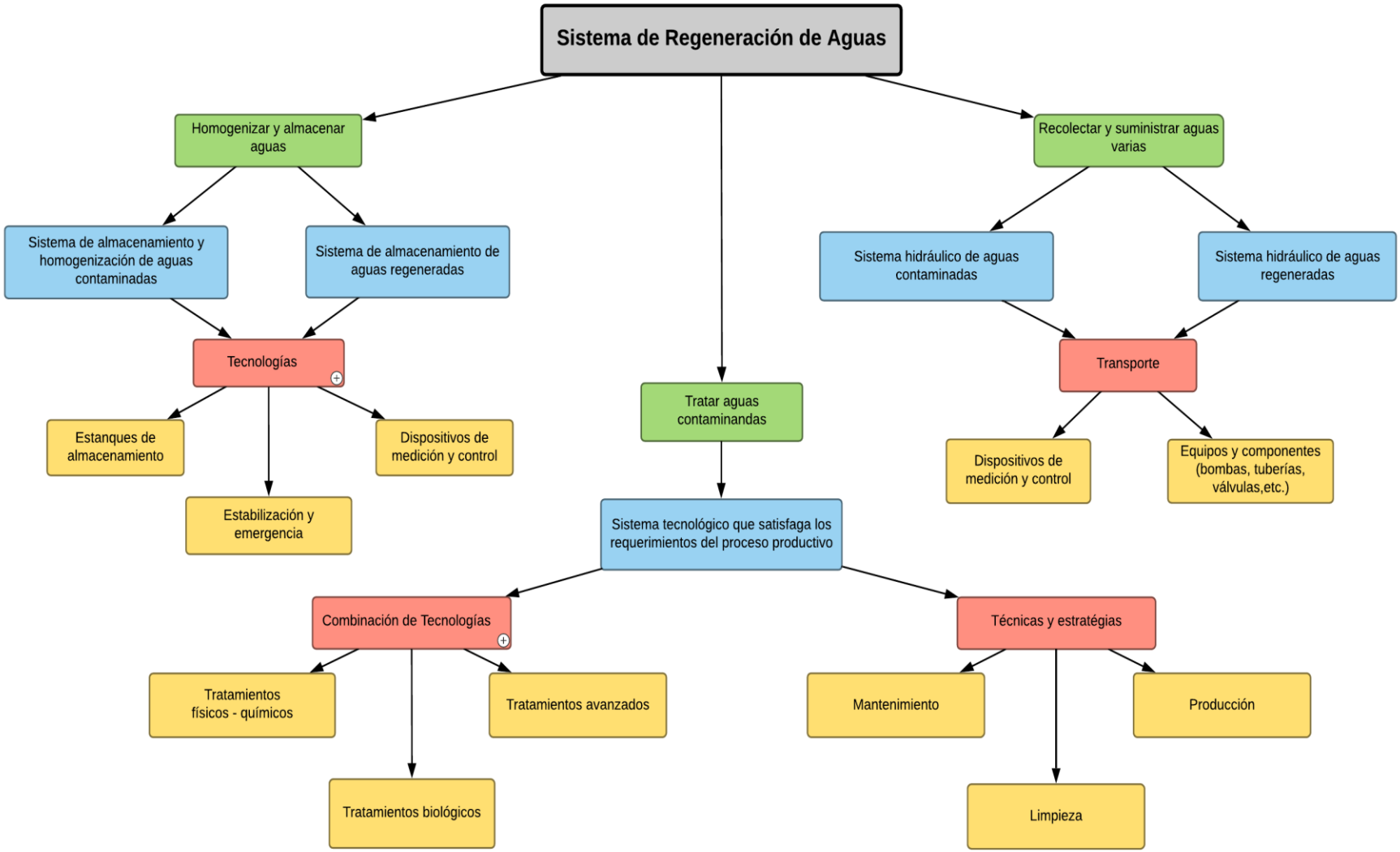


Figura 18: Árbol de funciones del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Fuente: elaboración propia.

2.4.2. Diagrama de relaciones (QFD)

El diagrama QFD (*Quality Function Deployment*) es una herramienta de planificación sistemática utilizada para transmitir las características de deben poseer los productos, servicios o procesos a lo largo de su desarrollo. Dicho de otra forma, esta herramienta se utiliza para transformar las necesidades y deseos de los clientes en requisitos de diseño de productos, servicios o procesos. (Ruiz-Falcó, 2009).

Anteriormente, se establecieron "Qué" necesidades tiene el proyecto, las cuales se clasificaron en; objetivos, funciones y restricciones, como también según la matriz secundaria a la cual repercute. Esto, para posteriormente buscar alternativas a "Cómo" dar respuesta a los objetivos, desarrollando especificaciones y requerimientos técnicos del proceso de tratamiento y reutilización de aguas.

Ahora, el siguiente paso es cuantificar las relaciones que poseen los "Qué", representados por los objetivos del proyecto, con los "Cómo", representados por las funciones, restricciones y las respuestas a los objetivos. Para esto, se realiza en base a un diagrama de relaciones QFD, el cual considera tres tipos de relaciones;

- Relación fuerte (**Θ**), posee un valor de puntuación de 9.
- Relación moderada (**O**), posee un valor de puntuación de 3.
- Baja relación (▲), posee un valor de puntuación de 1.

Así, cada uno de los objetivos del proyecto, previamente cuantificados según importancia o "peso", se relaciona con las variables técnicas de este, lo que permite determinar qué características de diseño del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, presentan mayor incidencia sobre las necesidades que presenta el proyecto.

Lo anterior, se realiza mediante la función suma producto, permitiendo determinar tanto el "peso total" de cada una de las variables técnicas, como su "peso relativo", identificando las variables de mayor importancia y permitiendo focalizar los esfuerzos en el posterior diseño de la propuesta.

A continuación, se identifican los objetivos del sistema junto a los requerimientos técnicos de este, con el objetivo de facilitar la lectura del diagrama de relaciones QFD. Posteriormente se expone el diagrama de relaciones.

Tabla 20: Objetivos deseables del proyecto numerados. Fuente elaboración propia.

Objetivos	***#***
No afecte la elaboración de los productos comercializados.	***1***
Se realice seguimiento de las calidades de las diferentes aguas.	***2***
Cuente con tecnologías para realizar tareas de limpieza.	***3***
Presente alta disponibilidad operacional.	***4***
Sistema con baja probabilidad de falla funcional.	***5***
No utilice sustancias corrosivas que puedan dañar el sistema a largo plazo.	***6***
Presente bajos tiempos de mantenibilidad.	***7***
Se adapte a la variabilidad de las condiciones operacionales existentes (caudal y concentración de contaminantes).	***8***
Altos caudales de regeneración.	***9***
Se cuantifique y monitoree las variables de desempeño e indicadores de interés.	***10***
Equipos con certificaciones.	***11***
No requiera grandes obras civiles ni espacios para operar.	***12***
Posea un bajo consumo energético.	***13***
Operación y mantenimiento de equipos sin necesidad de expertos.	***14***
Sistema de recuperación de sustancias.	***15***
La operación no presente riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores.	***16***
Posea una adecuada segregación y gestión de residuos originados por el proceso productivo.	***17***
El proceso de tratamiento genere un bajo impacto en el entorno y medio ambiente.	***18***

Tabla 21:Requerimientos técnicos numerados alfabéticamente. Fuente: elaboración propia.

Requerimientos técnicos	***#***
Parámetros técnicos de calidad de aguas empleadas en la producción de papeles y cartones.	***A***
Monitoreo de parámetros influyentes de calidad mediante cartas de control.	***B***
Sistema de limpieza CIP (Cleaning In Place).	***C***
Diseñar una configuración funcional del sistema, buscando una alta confiabilidad.	***D***
Componentes y equipos del sistema diseñados con materiales que no reaccionen frente a las condiciones físicas de operación.	***E***
La tecnología presente una vida útil ≥ 20 años en base a las condiciones de calidad de aguas.	***F***
Las tecnologías de tratamiento sean eficaces en remover contaminantes.	***G***
Recolecte y suministre las diferentes aguas del proceso.	***H***
Posea un sistema homogenización y almacenamiento.	***I***
El sistema esté capacitado para operar de manera continua.	***J***
Implementación de Mejores Técnicas Disponibles (MTD).	***K***
Caudal total de suministro de aguas regeneradas al sistema productivo ≥ 250 [m3/horas].	***L***
Sistema de emergencia (respaldo de agua fresca y vertimientos accidentales).	***M***
Capex < 6.000.000 [USD]	***N***
Opex < 1.000.000 [USD/año]	***Ñ***
Implementar una estrategia y plan de mantenimiento en base a un AMEF para equipos críticos, alineado con el mantenimiento al menor costo global.	***O***
Implementar 5S para facilitar las tareas de mantenimiento e identificación oportunidades de mejora.	***P***
Sistema de información, medición y control en base a KPI´S, que levante oportunidades de mejora.	***Q***
Capacitación de personal de operaciones y mantenimiento.	***R***
Gestión sobre componentes e insumos críticos del sistema de tratamiento.	***S***

					Nº Columna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
					Dirección	X	X	X	▲	X	▲	▲	X	X	▲	▲	▲	▼	▼	▼	▲	▲	▲	▲	▲
					Z	Calidad		Sistema tecnológico											Costos		Estratégias				
Nº Fila	X	Máx Fila	Peso Relativo	Peso / Importancia	"Cómos" / "Qués"	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S
1	Calidad	9	8,3	9,0	1	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ		Θ	Θ	Θ	Θ	▲	Θ	Θ	O	Θ	Θ	▲		O	
2		9	6,5	7,0	2	Θ	Θ			O	O			O				Θ	▲				Θ		
3		9	5,6	6,0	3	Θ		Θ	▲	Θ	O	Θ	Θ	O	Θ		▲		Θ	O		O		Θ	O
4	Disponibilidad	9	8,3	9,0	4	O		Θ	Θ	Θ	O	O	Θ	Θ	Θ		Θ	Θ	O	O	Θ	O	Θ	Θ	Θ
5		9	6,5	7,0	5			O	Θ			Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	▲	▲			▲	
6		9	3,7	4,0	6		Θ	Θ		Θ	Θ	Θ	O					▲		O					
7		9	2,8	3,0	7			▲				▲			Θ		Θ	Θ	▲	O	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ
8	Sist. Tec.	9	8,3	9,0	8	Θ	Θ	▲	Θ	O		Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	▲					
9		9	6,5	7,0	9		O				O	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ		Θ	Θ	▲				
10		9	5,6	6,0	10	Θ	Θ	▲				Θ	Θ	Θ	Θ				O	▲	Θ		Θ		
11		9	3,7	4,0	11			O	▲	O	O	Θ		▲	O		▲		O	O					
12	Costos	9	5,6	6,0	12	Θ	O	Θ	O			O	▲	▲		▲	▲	▲	Θ						▲
13		9	4,6	5,0	13	Θ		O	O			▲				O	▲	▲	▲	Θ			Θ		
14		9	3,7	4,0	14	Θ	Θ	Θ				Θ							O	O	O	O		Θ	O
15		9	2,8	3,0	15				O			Θ	O	Θ	O	Θ			Θ	▲					
16	HSEC	9	8,3	9,0	16	Θ	Θ	Θ		Θ	▲		Θ	O	Θ		Θ		O	▲		Θ		Θ	
17		9	5,6	6,0	17			Θ	O			Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	O	Θ	O	O		O	Θ		
18		9	3,7	4,0	18	Θ		▲		▲		▲			O	Θ	Θ	▲	Θ	Θ	Θ		Θ		
					Máx Columna	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
					Peso / Importancia	566,7	436,1	495,4	344,4	360,2	155,6	561,1	625,0	533,3	611,1	331,5	518,5	445,4	494,4	339,8	293,5	211,1	344,4	293,5	137,0
					Peso Relativo	7,0	5,4	6,1	4,3	4,4	1,9	6,9	7,7	6,6	7,5	4,1	6,4	5,5	6,1	4,2	3,6	2,6	4,3	3,6	1,7

Figura 19: Diagrama de relaciones QFD , el cual establece y cuantifica las relaciones entre cada uno de los objetivos deseados del proyecto y las características de diseño de la propuesta de mejora tecnológica.

A continuación, se expone una tabla con los requerimientos categorizados por prioridad según el peso ponderado que presentan, siendo; Alta > 6, Media > 4 y Baja < 4.

Tabla 22: Requerimientos técnicos categorizados por prioridad según los resultados obtenidos del diagrama de relaciones QFD. Fuente: elaboración propia.

Prioridad	**Requerimiento técnico**
Alta	*Parámetros tecnicos de calidad de aguas (DQO, SST, conductividad pH, etc.)*
	Sistema de limpieza CIP (Cleaning In Place).
	Las tecnologías de tratamiento sean eficaces en remover contaminantes.
	Recolecte y suministre las diferentes aguas del proceso.
	Posea un sistema homogenización y almacenamiento.
	El sistema esté capacitado para operar de manera continua.
	Caudal total de suministro de aguas regeneradas al sistema productivo ≥ 250 [m3/horas].
	Capex < 6.000.000 [USD]
Media	*Monitoreo de parámetros influyentes de calidad mediante cartas de control.*
	Diseñar una configuración funcional del sistema, buscando una alta confiabilidad.
	Componentes y equipos diseñados con materiales que no reaccionen a las condiciones físicas de operación.
	Implementación de Mejores Técnicas Disponibles (MTD).
	Sistema de emergencia (respaldo de agua fresca y vertimientos accidentales).
	Opex < 1.000.000 [USD]
	Sistema de información, medición y control en base a KPI´S, que levante oportunidades de mejora.
Baja	*Implementar una estrategia y plan de mantenimiento en base a un AMEF para equipos críticos, alineado con el mantenimiento al menor costo global.*
	Implementar 5S para facilitar las tareas de mantenimiento e identificación oportunidades de mejora.
	Capacitación de personal de operaciones y mantenimiento.
	Gestión sobre componentes e insumos críticos del sistema de tratamiento.
	La tecnología presente una vida útil ≥ 20 años en base a las condiciones de calidad de aguas.

Los requerimientos de alta y media prioridad, son propios del diseño de la propuesta de mejora, en cambio los de baja prioridad, son más bien estrategias que facilitan una mejor operación y disponibilidad del sistema y, si bien son importantes, no se considerarán en el presente estudio de pre-factibilidad del proyecto.

Cabe mencionar que, a pesar de que la vida útil de las tecnologías es fundamental a la hora de inclinarse por una u otra alternativa, los objetivos no se relacionaron de gran manera con este requerimiento. Así, al momento de decidir por una u otra alternativa, si estas presentasen una gran diferencia en su vida útil, deberá realizarse un análisis más detallado de costo – beneficio. Sin embargo, al momento de realizar las comparaciones, es probable que prácticamente la gran mayoría de las tecnologías presenten una vida útil similar o mayor a lo que fija el proyecto.

2.4.3. Búsqueda de alternativas (Benchmarking)

Para la búsqueda externa de tecnologías, las cuales se adecuen a los requerimientos del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, se genera una base de licitación técnica. A partir de esta, se invita a participar, a diferentes proveedores de tecnologías de tratamiento de aguas, en un proceso adjudicación de licitación técnica.

En base a esto, es posible obtener información detallada con respecto a las características de las tecnologías ofrecidas por lo proveedores. La base de información técnica, enviada a los proveedores, contiene:

- El Project Charter, el cual define y describe brevemente en que consiste el proyecto y qué objetivos persigue.
- Las condiciones operacionales que se tienen en cuanto a la generación de efluentes del proceso, detallando los rangos de valores de los parámetros contaminantes de interés y posibles caudales de generación de efluentes a tratar.
- Requerimientos técnicos en cuanto a calidad de las aguas regeneradas, estableciendo los valores mínimos que requiere el proceso y evaluando si la alternativa tecnológica ofrecida cumple o no con los valores exigidos.
- Requerimientos generales del proyecto, en donde se indican las distintas variables de interés de este correspondientes a las necesidades y requerimientos técnicos, claves en la selección de la alternativa tecnología a implementar.

A continuación, se expone un cuadro comparativo con las diferentes alternativas ofrecidas por lo proveedores. Cabe mencionar que todas las alternativas suministradas por los proveedores corresponden a tratamientos “end of pipe” o fin de línea en español y sólo consideran los costos asociados a los equipos suministrados, no los totales del sistema. Por otra parte, la base técnica de información como tal no se detalla debido a que contiene básicamente la misma información señalada en las secciones de 2.1, 2.2 y 2.3.

*Tabla 23: : Información suministrada por proveedores de tecnologías de tratamiento de aguas. *Indica que las sustancias de lavado CIP pueden ser dañinas al sistema si la concentración de los agentes de limpieza es muy elevada. Todas las certificaciones son ISO. Fuente: elaboración propia.*

	Proveedor	Agua Sigma - Quimtía			Proequipos	Streamwater - Waterleau		
	Alternativa	1	2	3	4	5	6	7
	Objetivos deseables claves	Sí - No (Valor)	Sí - No (Valor)	Sí - No (Valor)	Sí - No (Valor)	Sí - No (Valor)	Sí - No (Valor)	Sí - No (Valor)
Calidad del sistema	Sistema de control de parámetros de calidad de aguas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Tecnologías de limpieza	-	-	-	CIP	CIP	CIP	CIP
	Satisface requerimientos de calidad de aguas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Alta fiabilidad de la tecnología	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
Disponibilidad	Alta confiabilidad del equipo a nivel operacional (%)	97%	98%	97%	98%	98%	98%	97%
	Materiales inertes a las condiciones operacionales	No	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí
	Diseñados para operación continua	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Utiliza sustancias corrosivas potencialmente dañinas al sistema	No	No	No	Sí *	Sí *	Sí *	Sí *
	Capacitación y asistencia a mantenedores	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Disponibilidad de insumos y repuesto	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Capacitación para la operación	Sí	Sí	Sí	Sí	Si	Si	Si
	Vida útil de tecnología > 20 [años]	<25 años	>25 años	<25 años	<25 años	>25 años	>25 años	>25 años
Aguas	Elevado Caudal de regeneración [m^3/hr]	95	260	260	105	220	200	450
	Adaptación a variabilidad de cargas ([m^3/h] y [mg/L])	Sí	Sí	Sí	Sí	± 20%	± 20%	± 20%
	Suministro de estanques de almacenamiento [m^3]	200 - 800	200 - 800	200 - 800	200 - 800	> 1000	> 1000	> 1000
Costos asociados	Costo aproximado de operación [USD/año]	$500.000	$600.000	$650.000	-	$1.220.000	$720.000	$750.000
	Costo de adquisición [USD]	$4.600.000	$5.000.000	$6.000.000	$4.500.000	$6.985.000	$5.820.000	$6.400.000
	Consumo energético [KWh]	575	590	600	450	785	550	750
	Garantía de tecnología [años]	2	2	2	2	2	2	2
HSEC	Bajo riesgo operacional	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Bajo potencial contaminante	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Certificaciones	9.000-14.000	9.000-14.000	9.000-14.000	9.000-14.000	9.000-14.000	9.000-14.000	9.000-14.000

El detalle de los diversos equipos, considerados en las ofertas tecnológicas y suministradas por los respectivos proveedores, se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 24: listado de proveedores de tecnologías. Fuente: elaboración propia en base a información suministrada por proveedores.

Proveedor	Alternativa	Equipos considerados
Agua Sigma - Quimtia	***1***	*Coagulación - Floculación + DAF + Ultra Filtración + Osmosis Inversa*
Agua Sigma - Quimtia	***2***	*Electrocoagulador DAF + Ultra Filtración + Osmosis Inversa*
Agua Sigma - Quimtia	***3***	*Coagulación - Floculación + DAF + BRM + Osmosis Inversa*
Proequipos	***4***	*Coagulación - Floculación + Filtración Multimedia + Carbón Activado + Osmosis Inversa.*
Streamwater - Waterleau	***5***	*KROFTA® DAF + LUCAS®-3 Aerobic + KROFTA® DAF + EXSEL®UF/OI*
Streamwater - Waterleau	***6***	*KROFTA®DAF + BIOTIM®UASB+LUCAS®3 Aerobic + KROFTA®DAF 2 + EXSEL®UF/OI*
Streamwater - Waterleau	***7***	*KROFTA® DAF + LUCAS®-3 Aerobic + KROFTA® DAF 2 + EXSEL®UF/CCOI™*

Como se puede observar, en base a las condiciones operacionales especificadas, los proveedores suministran diversas alternativas tecnológicas, las cuales se adecuan a los requerimientos que exige el sistema productivo, cada una con sus propias características. Dichas alternativas son utilizadas posteriormente para generación de conceptos de diseño.

2.4.4. Tormenta de ideas (Brainstorming)

Esta herramienta de análisis se caracteriza por considerar diferentes puntos de vista frente a una problemática a resolver, empleando como principal recurso la creatividad y la experiencia de los participantes. Esta, a pesar de su simplicidad, es una potente herramienta utilizada en el desarrollo múltiples proyectos, independiente se la línea de acción de este. (Pistarelli, 2010).

En particular, el "centro" de la tormenta de ideas del proyecto es el "Sistema de Regeneración de Aguas". Así, este considera los diferentes ámbitos que involucra dicho sistema, abarcando desde las posibles técnicas y estrategias a implementar, hasta el dimensionamiento y características de las diferentes tecnologías empleadas por el sistema de tratamiento y reutilización de aguas.

A continuación, se expone el brainstorming del sistema, en el cual cada idea se encuentra categorizada según tópico de desarrollo.

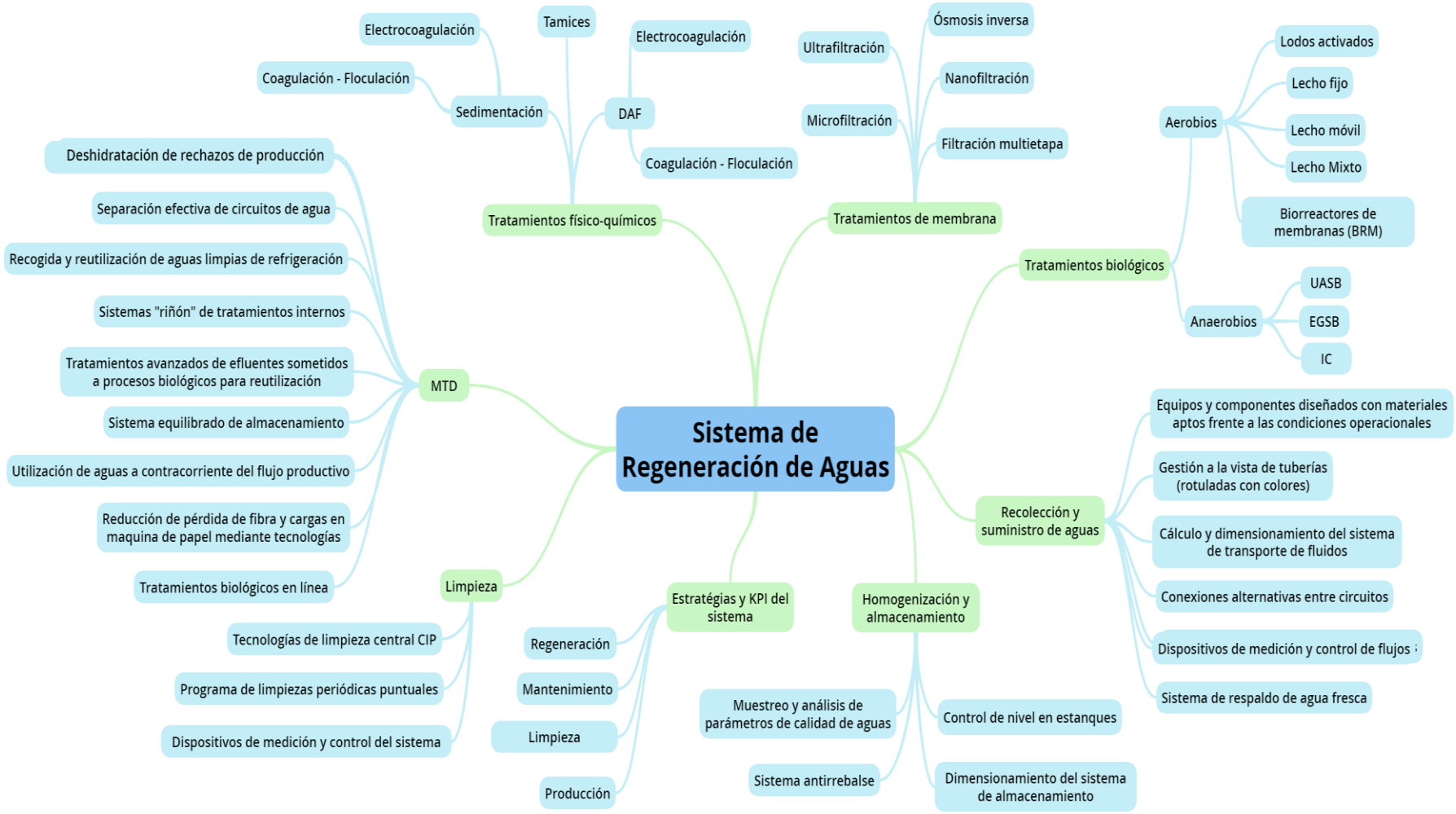


Figura 20: Brainstorming del sistema de regeneración de aguas, considerando los diferentes ámbitos de la propuesta de mejora. Fuente: elaboración propia.

2.4.5. Generación de alternativas de diseño

A continuación, se generan tres alternativas de diseño diferentes, donde cada una de ellas está basada en los equipos ofrecidos por los proveedores, que a priori, son las que más se adecuan a las necesidades establecidas. Además, se presentan otras consideraciones propias del diseño de la propuesta.

Tabla 25: Generación de alternativas tecnológicas para el diseño de la propuesta de mejora tecnológica. Fuente: elaboración propia.

	Ítem	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Recolección y suministro	Material	Acero al carbono	AISI 316/304	AISI 316/304
	Diseño circuito	Tipo Lineal	Circuitos múltiples	Circuitos múltiples
	Gestión a la vista	No	Sí	Sí
	Transporte de fluidos	Bombas (una por estación)	Bombas (Stand-by por estación)	Bombas (Stand-by por estación)
	Sistema de emergencia	Sí	Sí	Sí
	Válvulas	Bola (accionamiento manual y electroneumático)	Bola (accionamiento manual y electroneumático)	Bola (accionamiento manual y electroneumático)
Sistema de Tratamiento	Pre - tratamiento	Tamices	Deshidratación de rechazos	Tamices
	Físico - químicos	Coagulación - floculación + DAF	Electrocoagulación + DAF	Coagulación - floculación + DAF
	Biológicos	BRM	-	LUCAS ® (UASB + SBR)
	Membranas	RO	UF + OI	UF + OI
	Soporta lavado ácido/alcalino	Sí	Sí	Sí
	Caudal regeneración[m^3/h]	260	260	200
Control Limpieza	Limpieza puntual / Sistema central CIP (Cleaning In Place)	Sistema central CIP (Cleaning In Place)	Sistema central CIP (Cleaning In Place)	Sistema central CIP (Cleaning In Place)
Control	Medición puntual/ Seguimiento en el tiempo	Medición puntual	Seguimiento en tiempo	Seguimiento en el tiempo

Almacenamiento	***Ecualizador aguas contaminadas [m^3]***	*500*	*> 1000*	*> 1000*
	Sistema antirrebalse	*Sí*	*Sí*	*Sí*
	Agua regenerada [m^3]	*200*	*800*	*800*
Mejores Técnicas Disponibles	***Separación efectiva de circuitos de aguas***	*2 circuitos (agua de proceso y agua de refrigeración)*	*Múltiples circuitos*	*Múltiples circuitos*
	Tratamientos avanzados a efluentes bilógicos	*OI*	*-*	*UF + OI*
	Tratamientos internos	*No presenta (sólo utiliza tratamientos avanzados finales)*	*Sí*	*No presenta (sólo utiliza tratamientos avanzados finales)*
	Utilización de aguas a contracorriente	*Sí*	*Sí*	*Sí*
	Reducción de pérdida de fibra	*No presenta*	*Filtro de disco (circuito máquina papel)*	*DAF (circuito máquina papel)*
Costos	***CAPEX [USD]***	*$6.000.000*	*$5.000.000*	*$5.820.000*
	OPEX [USD/año]	*$650.000*	*$600.000*	*$720.000*
	Consumo Energético [KWh]	*600*	*595*	*550*

Posteriormente, estás alternativas son sometidas a una matriz de decisión, con el fin de determinar cuál de ellas presenta características más favorables para el proyecto, alineadas con los objetivos y restricciones de este.

CAPÍTULO 3:

3. Diseño de la Propuesta de Mejora Tecnológica

En la presente sección se diseña la propuesta de mejora tecnológica en base a todas las consideraciones realizadas y herramientas empleadas en el Capítulo 2, correspondiente a la Metodología de Trabajo.

En la primera sección, las tres alternativas anteriormente propuestas, se someten a una matriz de selección, con el fin de determinar cuál de ellas responde de mejor forma a las necesidades que presenta el proyecto. Esta, considera los pesos ponderados de cada uno de los objetivos y restricciones del sistema y evalúa el desempeño de cada una de las alternativas frente a la condición establecida, cuantificando este con un determinado valor numérico. Así, mediante la sumatoria de los desempeños, es posible determinar la puntuación total de cada alternativa, seleccionando la que presenta la puntuación más alta.

Seleccionada la alternativa, se procese a diseñar el diagrama *CAD* (Computer-Aided Design) de proceso el cual incluye los equipos principales del proceso de producción de papeles y cartones de embalaje, como también todos los equipos y componentes considerados en la propuesta de mejora del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Entre los cuales destacan; unidades de tratamiento de aguas, tuberías de los diferentes circuitos de aguas y producto, estanques de almacenamiento, sistemas de bombeo, sistemas de limpieza *CIP*, instrumentos de medición y control e intercambiadores de calor.

Posteriormente, se realiza un balance de masa de todas las aguas de proceso, con objetivo de determinar el desempeño del sistema de tratamiento de aguas, calculando el nuevo consumo de agua fresca del proceso, y establecer las bases para el cálculo del dimensionamiento de los equipos y componentes secundarios (bombas, tuberías y estanques).

Luego, se realiza el dimensionamiento del sistema de aguas, calculando la presión y potencia requerida por los diferentes sistemas de bombeo en base a los caudales requerimos por el sistema productivo. Esto, se realiza en base a ecuaciones que modelan la mecánica de fluidos de flujos turbulentos en canales cerrados (tuberías). Por otra parte, se determina el material y el diámetro nominal según norma de la tubería empleada en cada circuito y se calculan el volumen de los diferentes estanques de almacenamiento de aguas.

Finalmente, se establecen los *KPI* (Key Performance Indicator) del sistema de tratamiento y reutilización de aguas con el objetivo de medir y controlar el desempeño de este.

3.1. Matriz de selección de alternativa tecnológica

Con el objetivo de determinar cuál de las alternativas se adecua más a las necesidades del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, estas son sometidas a una matriz de decisión, la cual permite cuantificar el desempeño de cada alternativa frente a los objetivos y restricciones del proyecto. Cabe mencionar que, si bien las necesidades consideran los objetivos funcionales, todas las alternativas presentan estos atributos, ya que de lo contrario el sistema no sería funcional, debido a esto los objetivos funcionales no se consideran en la matriz de selección.

El puntaje ponderado de cada alternativa se determina mediante la multiplicación del peso relativo del atributo por la tarifa o desempeño que presenta cada alternativa con respecto al atributo a evaluar. La tarifa toma valores de 1 a 5, considerando como 1 el peor desempeño relativo y 5 el mejor desempeño relativo.

Así, la alternativa que presenta el valor más alto proveniente de la suma de cada ponderado es la alternativa que se seleccionará para el diseño de la propuesta de mejora tecnológica.

A continuación, se expone la matriz de selección de alternativas con su respectiva información:

Tabla 26: Matriz de selección de alternativa tecnológica mediante la evaluación de las necesidades y requerimientos del proyecto, con sus correspondientes pesos relativos. Fuente: elaboración propia.

		Alternativa 1		***Alternativa 2***		***Alternativa 3***	
Objetivos y restricciones	***Peso relativo***	***Tarifa***	***Ponderado***	***Tarifa***	***Ponderado***	***Tarifa***	***Ponderado***
No afecte la elaboración de los productos comercializados.	***8,33***	***5***	***41,67***	***5***	***41,67***	***5***	***41,67***
Se realice seguimiento a las calidades de las diferentes aguas.	***6,48***	***3***	***19,44***	***5***	***32,41***	***5***	***32,41***
Cuente con tecnologías para realizar tareas de limpieza.	***5,56***	***5***	***27,78***	***5***	***27,78***	***5***	***27,78***
Presente alta disponibilidad operacional.	***8,33***	***4***	***33,33***	***4***	***33,33***	***4***	***33,33***
Sistema con baja probabilidad de falla funcional.	***6,48***	***3***	***19,44***	***4***	***25,93***	***4***	***25,93***
No utilice sustancias corrosivas que puedan dañar el sistema a largo plazo.	***3,70***	***4***	***14,81***	***4***	***14,81***	***4***	***14,81***

Presente bajos tiempos de mantenibilidad.	***2,78***	***3***	***8,33***	***4***	***11,11***	***4***	***11,11***
Se adapte a la variabilidad de las condiciones operacionales existentes (caudal y concentración de contaminantes).	***8,33***	***5***	***41,67***	***5***	***41,67***	***5***	***41,67***
Altos caudales de regeneración	***6,48***	***2***	***12,96***	***5***	***32,41***	***5***	***32,41***
Se cuantifique y monitoree las variables de desempeño e indicadores de interés del sistema.	***5,56***	***3***	***16,67***	***4***	***22,22***	***4***	***22,22***
Equipos con certificaciones	***3,70***	***5***	***18,52***	***5***	***18,52***	***5***	***18,52***
No requiera grandes obras civiles ni espacios para operar.	***5,56***	***3***	***16,67***	***5***	***27,78***	***3***	***16,67***
Posea un bajo consumo energético.	***4,63***	***3***	***13,89***	***3***	***13,89***	***4***	***18,52***
Operación y mantenimiento de equipos sin necesidad de expertos.	***3,70***	***3***	***11,11***	***3***	***11,11***	***3***	***11,11***
Sistema recuperación de sustancias.	***2,78***	***1***	***2,78***	***4***	***11,11***	***4***	***11,11***
La operación no presente riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores.	***8,33***	***5***	***41,67***	***5***	***41,67***	***5***	***41,67***
Posea una adecuada segregación y gestión de residuos originados por el proceso productivo.	***5,56***	***3***	***16,67***	***4***	***22,22***	***4***	***22,22***
El proceso de tratamiento genere un bajo impacto en el entorno y medio ambiente.	***3,70***	***5***	***18,52***	***5***	***18,52***	***5***	***18,52***
El sistema esté capacitado para operar de manera continua.	***7,50***	***5***	***37,5***	***5***	***37,5***	***5***	***37,5***
La tecnología presente una vida útil > 20 años en base a las condiciones de calidad de aguas.	***1,90***	***5***	***9,5***	***5***	***9,5***	***5***	***9,5***

OPEX < 1.000.000 [USD]	***4,20***	***3***	***12,6***	***4***	***16,8***	***2***	***8,4***
CAPEX< 6.000.000 [USD]	***6,10***	***2***	***12,2***	***4***	***24,4***	***3***	***18,3***
Componentes y equipos diseñados con materiales que no reaccionen a las condiciones físicas de operación.	***4,40***	***3***	***13,2***	***4***	***17,6***	***4***	***17,6***
Sistema de emergencia (respaldo de agua fresca y vertimientos accidentales).	***5,50***	***5***	***27,5***	***5***	***27,5***	***5***	***27,5***
Capacitación de personal de operaciones y mantenimiento.	***3,60***	***4***	***14,4***	***4***	***14,4***	***4***	***14,4***
Caudal de regeneración ≥ 250 [m3/horas].	***6,40***	***3***	***19,2***	***5***	***32***	***5***	***32***
Total de puntuación		***522,03***		***627,85***		***606,87***	
Posición		***3***		***1***		***2***	

Como se puede observar la alternativa que presenta mayor puntaje ponderado es la A2, seguida por la A3 y dejando en último lugar la A1. Así, la A2 es la que se considera para hacer efectivo el diseño de la propuesta de mejora tecnológica.

3.2. Diseño del sistema de tratamiento y reutilización

Con la alternativa ya seleccionada es posible realizar el diseño del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. La propuesta consiste en tratamientos integrados al proceso productivo y no “end of pipe”, como suele presentarse en el común de los sistemas de tratamiento de aguas, facilitando la operación de plata papelera bajo un ciclo cerrado de aguas mediante tratamientos en línea.

Para conseguir esto, previamente es necesario contar con una adecuada gestión de sobre los diferentes circuitos de aguas que intervienen en la fabricación de los productos, separándolos estrictamente en base a su grado de contaminación. (IPPC, 2006).

El hecho de contar con una separación estricta de los circuitos de agua permite tener un mayor control sobre los efluentes debido a que las aguas presentan una menor variabilidad en cuanto a los contaminantes presentes en el fluido a tratar, facilitando su remoción y repercutiendo de manera

directa en los costos operacionales del proceso, consiguiendo una disminución en estos. (IPPC, 2006).

En el mismo marco sobre una adecuada gestión del recurso hídrico, se tiene que a pesar de que la utilización del agua es transversal en todo el proceso productivo, los requerimientos de calidad presentan variaciones dependiendo la etapa productiva en la que se encuentre. Específicamente, la cadena productiva de papeles y cartones de embalaje a partir de fibra recuperada se puede dividir en dos grandes circuitos de agua; el de preparación de la pasta y el de la máquina de papel. La calidad de agua requerida por el proceso de preparación de la pasta es menor que la calidad requerida por la máquina de papel. (IPPC, 2006).

El hecho de cerrar circuitos de aguas requiere la implementación de tecnologías de tratamiento en línea. Esto se debe a que, con el paso del tiempo, la concentración de materia orgánica y de otros contaminantes, presenta un constante aumento. De hecho, plantas papeleras que han decidido cerrar sus circuitos, se han visto en la obligación de volver a abrirlos debido a problemas en la calidad de sus productos, malos olores en el proceso productivo y problemas de corrosión. (IPPC, 2006).

En base a estos antecedentes, nace la idea de implementar sistemas "riñón", los cuales son pequeñas estaciones de tratamiento de aguas que tratan corrientes parciales del proceso productivo (IPPC, 2006). Básicamente se diseñan dos estaciones de tratamiento, una para la preparación de pasta y otra para la máquina de papel, donde la separación de estos se realiza mediante unidades de deshidratación de pasta, específicamente por el filtro de disco y la prensa tornillo para el proceso productivo base considerado en el modelo.

Cabe mencionar que, el sistema de tratamiento está diseñado para soportar el rango de variabilidad establecido anteriormente, en cuanto a la concentración de contaminantes presentes en los efluentes. Además, este se encuentra capacitado para operar de manera continua las 24 horas del día. Por otra parte, con el objetivo de disminuir la probabilidad de falla funcional de los diferentes sistemas de bombeo es que se implementa un sistema stand-by por cada estación de bombeo.

A continuación, se describen detalladamente cada circuito de regeneración considerado en la propuesta de mejora tecnológica.

3.2.1.Circuito de preparación pasta

Este circuito de agua es el que presenta mayores niveles de contaminación de materia orgánica disuelta y coloidal, donde el cerramiento de circuitos es susceptible producir inconvenientes como los antes descritos. Por este motivo, se decide implementar un equipo de Electroflotación, el cual posee ocho celdas paralelas de electrocoagulación, ya que esta tecnología permite una reducción considerable de la DQO (Gilpavas, 2008).

Experiencias operativas muestran que manteniendo un nivel de DQO entre $7.000 - 8.000\ \left[\frac{mg}{L}\right]$ no deberían presentarse problemas asociados a la materia orgánica presente en las aguas de proceso. (IPPC, 2006). En base a la información suministrada a los proveedores, se tiene que el equipo de electroflotación presenta las siguientes características.

Tabla 27: Parámetros de aguas regeneradas a la salida del equipo de Electroflotación. Fuente: elaboración propia en base a información proporcionada por proveedores de tecnologías.

Especificaciones ElectroDAF	***Valor***	***Unidad***
Consumo de Energía	*160*	$[KWh]$
Consumo de Floculante	*26*	$[Kg/día]$
Costo Floculante	*5*	$[USD/Kg]$
Superficie Flotación	*33*	$[m^2]$
Número de Celdas de electrocoagulación	*8*	$[-]$
Tipo de Electrodos	*Intercambiables*	$[-]$
Producción de Lodos (Consistencia 5%)	*3*	$[t/día]$
DQO Salida	*1.400*	$[mg/L]$
SST Salida	*50*	$[mg/L]$

En consecuencia, es posible afirmar que el proceso de electroflotación satisface teóricamente las condiciones de requeridas por el sistema productivo, permitiendo regenerar aguas a una calidad adecuada para el proceso de preparación de pasta.

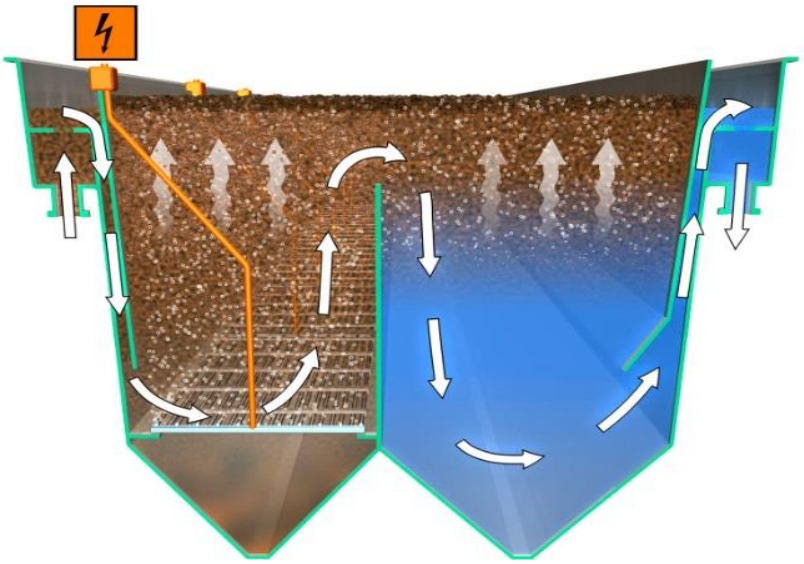


Figura 21: Descripción gráfica del funcionamiento de un equipo de electroflotación para el tratamiento de aguas. Fuente: EnviroChemie GmbH.

Debido a que en la preparación de la pasta están involucrados diversos procesos de limpieza se generan rechazos, los cuales en su mayoría son un conjunto de elementos no fibrosos como plásticos, vidrios, etc., un porcentaje de fibras y agua. (IPPC, 2006). En base esto, previo al ecualizador de aguas contaminadas y al equipo de electroflotación es necesario someter a estos a un proceso de deshidratación. Este, consiste en un secador de tambor rotativo en línea con un filtro de prensa, los cuales se utilizan para deshidratar los rechazos del proceso y los lodos generados por los equipos de electroflotación y ultrafiltración (equipo utilizado en el circuito de regeneración de aguas de la máquina de papel), alcanzado un contenido de materia seca del 80%, maximizando la gestión del recurso hídrico.

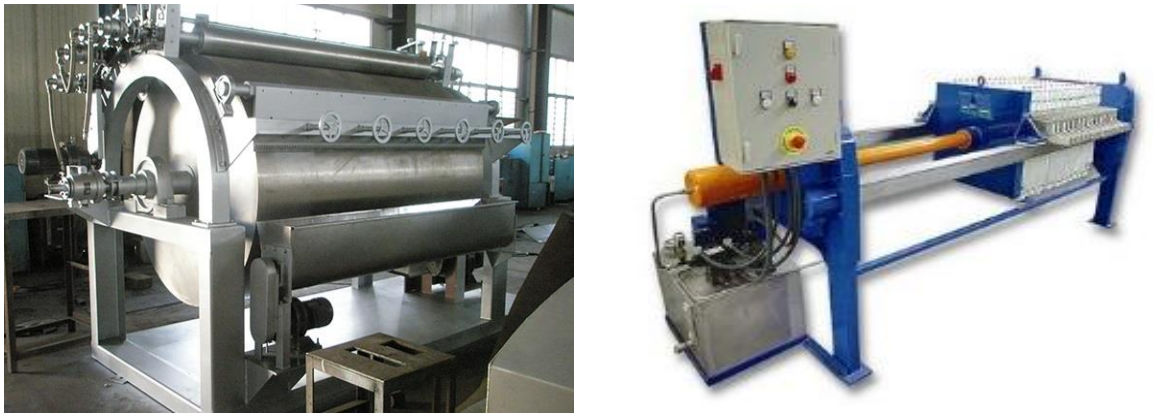


Figura 22: Unidad de deshidratación: (a) Secador de tambor rotativo. (b) Filtro de prensa. Fuente: YIMIN y GEDAR respectivamente.

Así, el circuito de aguas simplificado del proceso de preparación de pasta queda del siguiente modo.

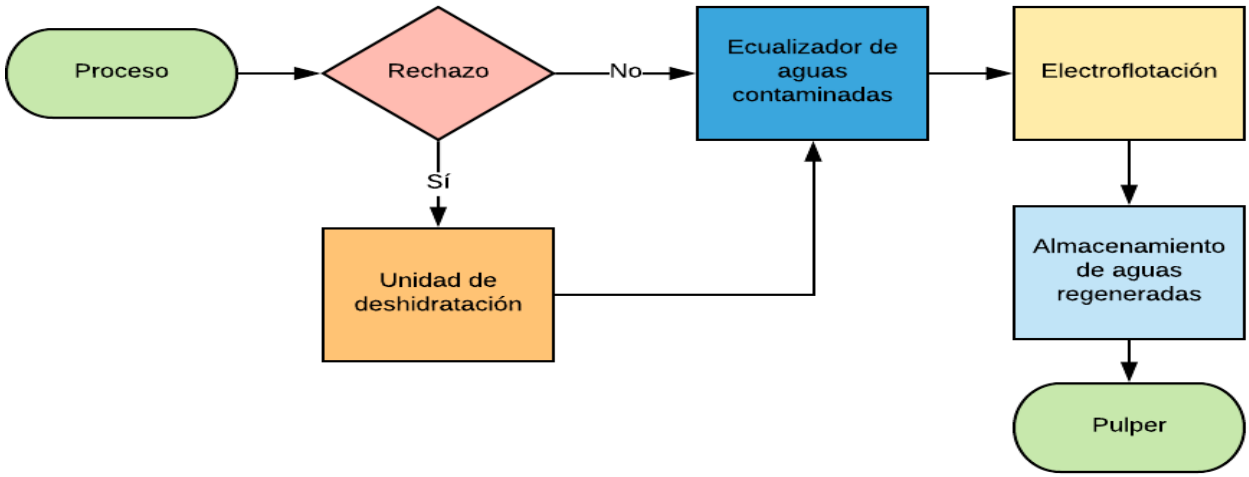


Figura 23: Diagrama de proceso de circuito de regeneración de aguas correspondiente a la sección de preparación pasta. Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar que, posterior a la etapa de trituración y limpieza de la pasta, esta es sometida a procesos de deshidratación, donde se emplean filtros de disco y filtros de presa, liberándose una gran cantidad de agua, la cual es enviada al ecualizador de aguas contaminadas del circuito de preparación pasta. Así, el ecualizador de aguas contaminadas recibe aguas provenientes de la unidad de deshidratación (secador de tambor y filtro de prensa), como también de los propios procesos de deshidratación del proceso productivo.

La deshidratación de la pasta es necesaria por las condiciones técnicas en que se desarrollan los procesos de refino y dispersión, los cuales mejoran la resistencia a esfuerzos y la calidad superficial de los productos respectivamente. Este hecho, tiene como consecuencia un aumento en la consistencia de la pasta (masa de pasta seca dividida la masa de pasta seca más agua, esto se abordará más adelante), pasando de una consistencia del 4% al 30%. Además, cabe mencionar que la deshidratación de la pasta es beneficiosa para conseguir una adecuada separación entre los circuitos de preparación de pasta (aguas más sucias) y el de aproximación de la máquina de papel (aguas más limpias). (IPPC, 2006).

Una vez en el estanque ecualizador de aguas contaminadas, estas son enviadas al equipo de electroflotación, para ser sometidas a tratamiento, o simplemente al Pulper, recirculado exentas de tratamiento por el proceso trituración y limpieza. En el caso de las aguas regeneradas, luego del tratamiento, las aguas son enviadas al estanque de almacenamiento de aguas regeneras del circuito de preparación pasta, para posteriormente ser enviadas al Pulper y comenzar nuevamente el ciclo productivo.

3.2.2.Circuito de máquina de papel

El agua proveniente de la máquina de máquina de papel es conocida comúnmente como agua blanca, esta obedece su nombre a que contiene fibras que no fueron retenidas por la tela de la máquina o producto de la limpieza de está mediante los rociadores. Prácticamente, toda el agua blanca proveniente del proceso de deshidratación de la pasta que tiene lugar en la máquina de papel, es enviada y almacenada en el Foso Tela. (IPPC, 2006).

En el Foso Tela entran y salen grandes volúmenes de agua por unidad de tiempo, comúnmente este gran estanque distribuye aguas a diferentes secciones de proceso, tanto a los reguladores de consistencia ubicados en las proximidades al cajón (o caja) de entada de la máquina, como también a los departamentos de preparación de la pasta. (Taschke, y otros, 1998).

Particularmente, la propuesta de mejora busca gestionar y optimizar el consumo de aguas fresca, por lo que se propone cerrar al máximo los circuitos de aguas involucrados en la producción de papel. En esta línea, parte importante del agua del Foso Tela se utiliza como alimentación al Regulador de Consistencia dispuesto antes del ingreso de la pasta a la máquina de papel mediante el cajón de entrada (ahora denominado *RC2*), donde se requiere una consistencia del 0,5% (IPPC, 2006).

El resto del agua blanca es enviado a un filtro de discos de microtamices, específicamente con una malla filtrante de $1.000[\mu m]$, el cual permite remover sólidos suspendidos en el agua blanca y con esto disminuir la turbidez de esta. En el marco de una adecuada gestión de los recursos disponibles, los rechazos del filtro de discos (ricos en fibra de papel) son enviados al almacenamiento de pasta de la Cuba Máquina. Este hecho permite recuperar alrededor de un 2% de las toneladas de pasta producidas por unidad de tiempo (IPPC, 2006), es decir para la producción diaria considerada en el modelo correspondiente a $750[Adt]$, la recuperación de fibras diarias alcanza las $15[t]$.

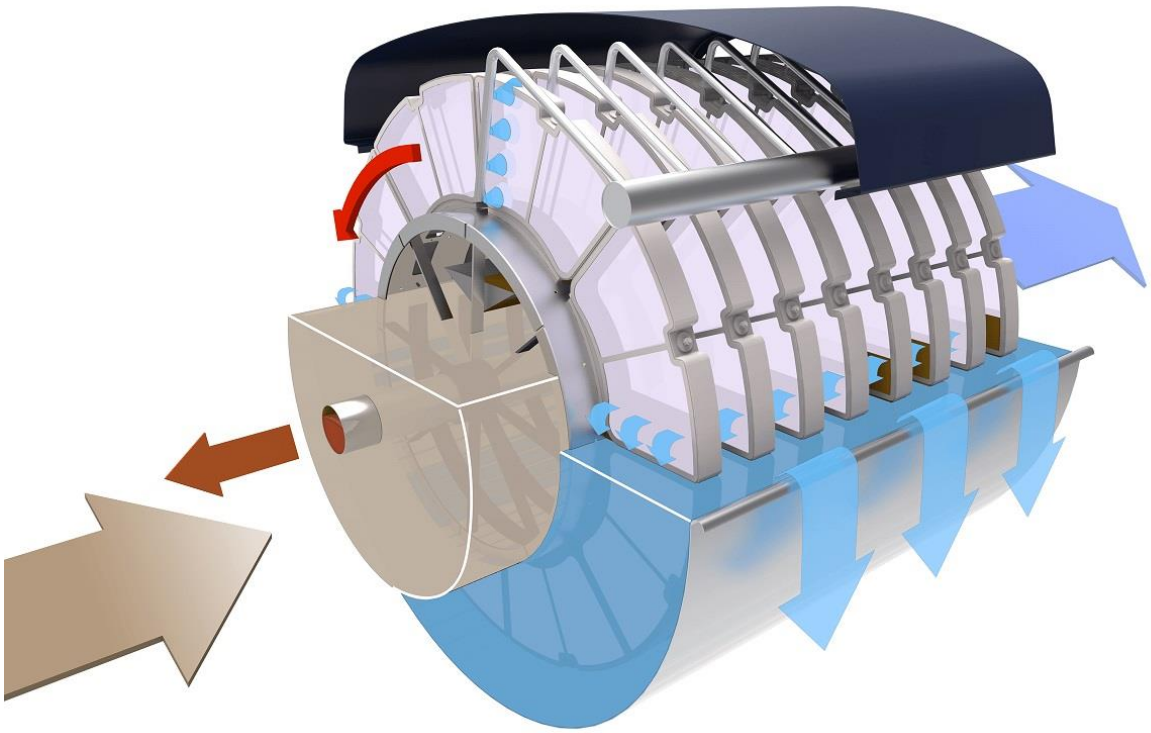


Figura 24: Descripción gráfica del funcionamiento de un filtro de discos. Fuente: WMT.

El agua clara, proveniente del filtro de disco, es enviada al ecualizador de aguas claras, el cual alimenta al Regulador Consistencia que se encuentra posterior de la unidad de deshidratación de la pasta (ahora denominado *RC1*). El *RC1* permite pasar de una consistencia del 30% (consistencia empleada en el proceso de refino y/o dispersión) a una consistencia de 1%. Esto se debe a que, el último proceso de limpieza de la pasta correspondiente al de depuración ciclónica y depuración fina, ubicado antes de la Cuba Máquina, requiere una baja consistencia. (IPPC, 2006).

El exceso de agua clara se envía a la unidad de Ultra Filtración (UF), la cual, junto al filtro de discos, son los equipos que regeneran agua al circuito de la máquina de papel. Al igual que el circuito de preparación de la pasta, el aumento del reciclaje de agua de proceso en máquinas de papel y cartón, causa un aumento en la concentración de los componentes orgánicos e inorgánicos coloidales y disueltos en dichas corrientes. Según las características de la alimentación de pasta y

los agentes químicos utilizados en la fabricación del papel, los sistemas de agua cerrados pueden tener un efecto negativo en la operatividad de la máquina, la calidad del producto final, e incluso los costes de producción debidos al mayor uso de agentes químicos. (IPPC, 2006).

Concentraciones elevadas de esta "basura aniónica" puede afectar la retención y formación de la hoja de papel y aumentar la obstrucción de los fieltros de la prensa de la máquina, haciendo que la hoja de papel se pegue a los rodillos de la máquina. (Taschke, y otros, 1998). Así, en base a lo anterior, al cerrar los circuitos de agua de la máquina de papel se hace necesario contar con equipos como los incorporados en la presente propuesta, que permitan eliminar contaminantes perjudiciales para el proceso.

En consecuencia, una pre-filtración en combinación con una unidad UF, es una alternativa interesante a considerar como sistema de regeneración de aguas para la máquina de papel. Esto se debe a que la relación costo – beneficio es favorable, debido a que la calidad del filtrado UF es "suficiente" para su utilización en rociadores de limpieza (tanto de tela y de prensa), agua de sello del sistema de bombas de vacío (el cual contribuye a la deshidratación en la sección de tela y de prensa) e incluso para la dilución de aditivos químicos empleados en la máquina de papel. (IPPC, 2006).

A continuación, se exponen algunas características de la unidad de ultrafiltración ofrecida por los proveedores.

Tabla 28: Características técnicas de la unidad de ultrafiltración suministrada por los proveedores de tecnologías. Fuente: elaboración propia.

Especificaciones Unidad UF	***Valor***	***Unidad***
Consumo de Energía	*150*	$[KWh]$
Superficie Filtración	*3.300*	$[m^2]$
Tipo de Membrana	*Fibra Hueca Encapsulada*	$[-]$
Tamaño de Filtrado	*0,02*	$[\mu m]$
Ratio de Filtración	*50*	$L/h/m^2$
Producción de Lodos (Consistencia 5%)	*108*	$[t/día]$

La unidad UF elimina en la práctica el 1% de SST, un 99% de bacterias, el 100% de la turbidez (se elimina todo el material coloidal), y un 45 -70% de la carga aniónica, mientas que la DQO disuelta se reduce alrededor de un 10 - 20%. (IPPC, 2006).

Cabe mencionar que, el concentrado (rechazo) de la unidad de ultrafiltración, es enviado posteriormente a la unidad de deshidratación, ubicada en el circuito de regeneración preparación pasta, con el objetivo de maximizar la gestión del recurso hídrico, permitiendo alcanzar un contenido de materia seca del 80%

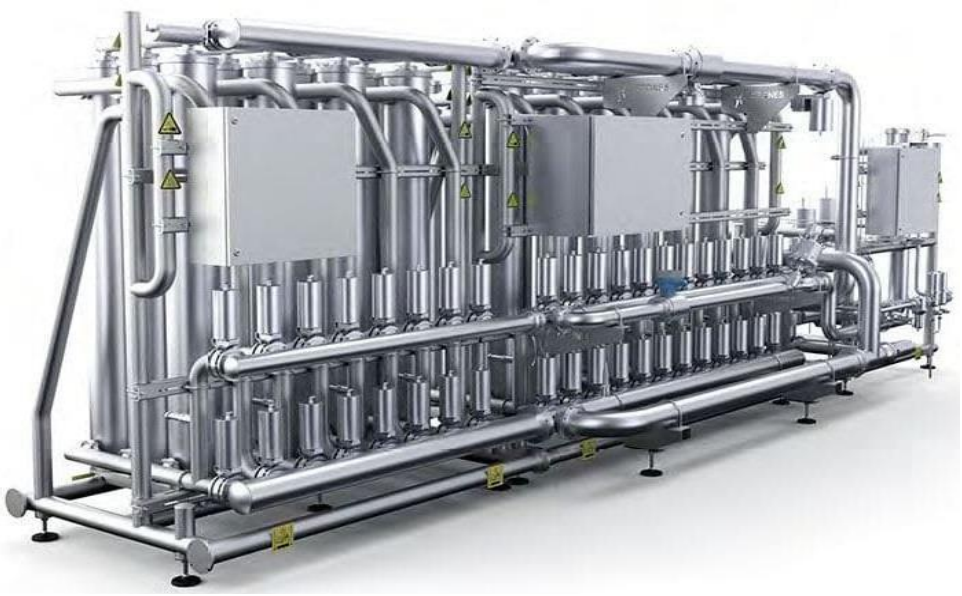


Figura 25: Unidad de ultrafiltración para agua de acero inoxidable. Fuente: KRONES.

Así, la unidad *UF* en conjunto con el filtro de discos, conforman la "batería de equipos" de regeneración del circuito de la máquina de papel, los cuales satisfacen la demanda de calidad de dicho sistema. A continuación, se expone un diagrama resumido del sistema de regeneración del circuito de la máquina de papel.

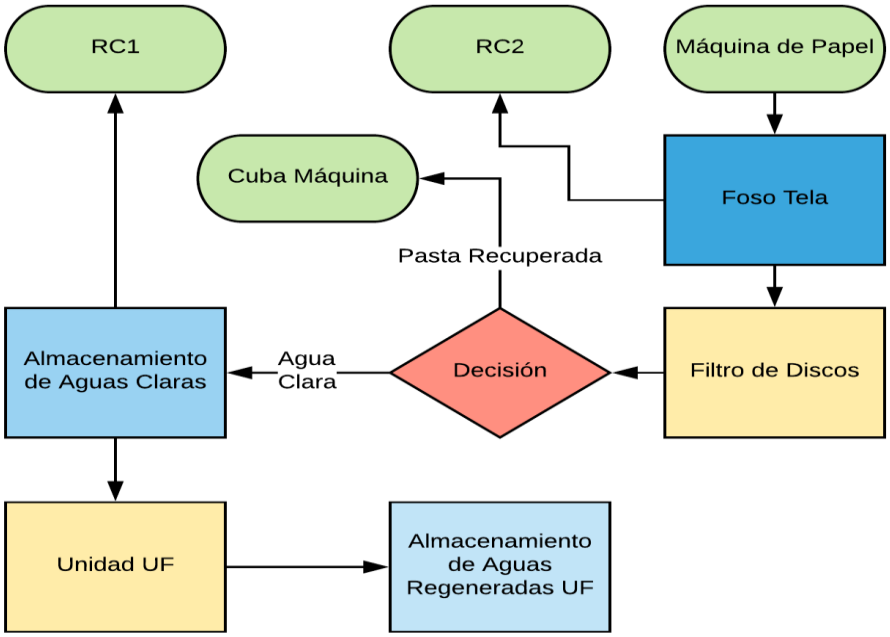


Figura 26: Diagrama de proceso del sistema de regeneración de aguas correspondiente al circuito de la máquina de papel. Fuente elaboración propia.

Cabe mencionar que la unidad de Osmosis Inversa (OI), considerada inicialmente para tratar las aguas de proceso en la presente en la alternativa seleccionada, es desechada. Esto ya que, teóricamente con una adecuada separación entre los circuitos de agua en base a su grado de contaminación a partir de las unidades de deshidratación y la presencia de equipos de regeneración como lo son el filtro de discos y la unidad *UF*, es posible lograr una calidad de agua que satisface los requerimientos de las unidades más exigentes de la máquina de papel (rociadores de alta presión), en cuanto a calidad. A consecuencia de esto, tanto los costos totales de inversión como también los costos totales operacionales de la propuesta, debiesen disminuir haciendo más competitiva la implementación de la propuesta de mejora tecnológica.

3.2.3. Diseño del sistema de regeneración de aguas

El diagrama de proceso, expuesto en la sección de Anexos, contiene todas las consideraciones realizadas anteriormente en las secciones 3.2.1 y 3.2.2, presentando básicamente dos grandes circuitos de regeneración, el de preparación de pasta y el de la máquina de papel.

A pesar de que se cuenta con una adecuada separación de entre los circuitos de agua de preparación de pasta (aguas más sucias) y el de la máquina de papel (aguas más limpias), mediante unidades de deshidratación, siempre el circuito de preparación de pasta poseerá un déficit de agua, a pesar de contar con un circuito cerrado. Esto se debe, a que la pasta pasa del circuito de preparación al de la máquina de papel, con una consistencia de 30%, es decir aún con un importante porcentaje de agua en su interior.

A consecuencia de lo anterior, es necesario añadir constantemente agua al circuito de preparación de pasta. Esta adición se realiza a contracorriente (o contraflujo) de la producción de papel, es decir desde el circuito de la máquina de papel al de pasta, sin mayores problemas, ya que la calidad de agua que requiere el circuito de pasta es menos exigente que el que posee la máquina de papel. Este hecho es una más de las *MTD* que considera la propuesta de mejorar que se desea implementar.

De esta manera, debido a que el déficit de agua del circuito de preparación pasta lo cubre el sistema de regeneración de la máquina de papel, el ingreso de agua fresca sólo se realiza por el circuito de la máquina de papel.

Para realizar el diseño del diagrama de proceso se utiliza el software AutoCAD 2018, donde se pueden encontrar los siguientes equipos y componentes:

- Unidades de tratamiento de aguas consideradas; Deshidratador de rechazos (Secador de Tambor y Filtro de Prensa), ElectroDAF, Filtro de Discos y la Unidad de Ultra Filtración.
- Principales equipos del proceso productivo de papeles cartones de embalaje, considerando el departamento de preparación de la pasta y el de la máquina de papel.
- Circuitos de tuberías de diferentes tipos de aguas y de proceso productivo, implementando la propuesta de gestión a la vista de tuberías (rótulos y colores)

- Estanques de ecualizadores de aguas contaminadas y de almacenamiento de aguas regeneradas.
- Sistemas de bombeo de las diferentes aguas (contaminadas y regeneradas) utilizadas en el proceso de producción de pasta y papal.
- Sistema de limpieza CIP (Clean In Place), con sus respectivos puntos de acción.
- Sistemas de emergencia, de respaldo de agua fresca y de anterribalse de estanques.
- Unidades de Análisis de Aguas (UAA).
- Identificación de flujo másico de sustancias (a partir del balance de masa del sistema).
- Almacenamiento de materias de entrada y salida (materia prima, productos terminados, lodos húmedos y rechazos secos).
- Intercambiadores de calor, utilizados para calentar fluidos que intervienen en el proceso productivo.

Como se mencionó anteriormente, la propuesta considera gestión a la vista de tuberías, facilitando de esta manera la identificación de cada una de estas y el sentido de flujo del fluido. Esto se vuelve fundamental en fábricas que presentan múltiples redes de tuberías, como sucede en las industrias de celulosa y papel. De esta manera, al realizar cualquier nuevo proyecto o una mejora al proceso existente, se cuenta con una rápida identificación de la tubería de interés, disminuyendo considerablemente los tiempos de trabajo y posibilitando realizar arranques deseados con absoluta certeza. Además, se facilita un proceso limpio, ordenado y controlado. (Fundametos de Calidad UTFSM, 2015).

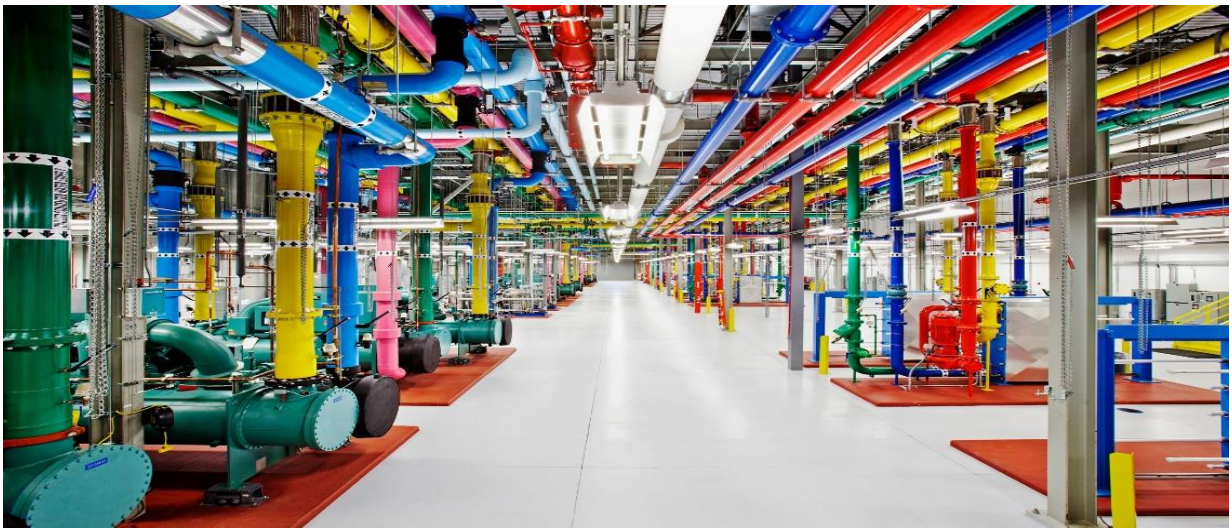


Figura 27: Fábrica con gestión a la vista de tuberías. Fuente: internet.

En el Anexo XIII se expone el plano que contiene el diagrama de proceso de la propuesta de mejora a nivel de equipos y componentes. Este, se encuentra normado en base a la norma ISO 10.628 (para la identificación de los distintos equipos y componentes de forma universal) y la NCh 14 (para el cuadro de rotulación).

3.3. Balance de aguas del sistema

Con el objetivo de cuantificar los volúmenes de agua que circulan en el sistema, se realizan múltiples balances de masa en el sistema de regeneración de aguas. Esto, permite posteriormente dimensionar los equipos y componentes del sistema hidráulico y, determinar, cuánto es el consumo de agua fresca al implementar la presente propuesta de mejora tecnológica.

Todos los cálculos utilizados para determinar la cantidad de agua que fluye por el proceso productivo y por sistema de regeneración de aguas, se realizan en base a la consistencia de la pasta ($Cs(\%)$). Esta, es una de las variables más importantes en el proceso de producción de celulosa y papel, ya que múltiples etapas del proceso productivo operan en base a este valor, existiendo diversos equipos de regulación de consistencia (extrayendo y suministrando agua) a lo largo de la cadena productiva. (Taschke, y otros, 1998). Así, la consistencia de la pasta se define en base a la siguiente ecuación:

$$Cs(\%) = \frac{Masa\ total\ de\ material\ fibroso\ seco}{Masa\ total\ de\ pulpa} * 100\ \% \quad (1)$$

En el presente estudio, para la masa total de la pulpa, sólo se considera el aporte másico del material fibroso (papeles y cartones recuperados) y el del agua, sin considerar otros aditivos. Sin embargo, esta se considera una buena aproximación ya que la adición de otros componentes es prácticamente despreciable en comparación con las masas de fibra y agua. (IPPC, 2006). Así,

$$Masa\ total\ pulpa = Masa\ total\ de\ material\ fibroso + Masa\ total\ de\ agua$$

Además, otro supuesto importante a considerar es que el sistema se encuentra en estado estacionario y existe conservación de la masa a lo largo de todo el sistema.

Previo a realizar el balance de aguas del sistema, es necesario determinar la cantidad de materia seca que ingresa al inicio del proceso. En base al modelo establecido, se tiene que la masa de papel de salida son $750[ADt]$. Por otro, se tiene que, para procesos de producción de papeles y cartones, en base a fibra recuperada, los rechazos totales son alrededor del 6% de la materia de entrada. Además, la pérdida de fibra en la tela alcanza el 2% del material de salida. (IPPC, 2006).

Considerando que la fibra perdida es recuperada íntegramente mediante el Filtro de Discos, el balance de masa seca presente en el sistema está determinado por la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{MP} = \dot{m}_{rechazos} + \dot{m}_{producto} \quad (3)$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{MP} = 0{,}06 * \dot{m}_{MP} + \dot{m}_{producto}$$

$$\dot{m}_{MP} = 797{,}87\ [t/día]$$

Suponiendo una operación continua y uniforme las 24 horas del día, se tiene que la materia prima de entrada corresponde a,

$$\dot{m}_{MP} = 33{,}24\ [t/hr]$$

Otra consideración que cabe mencionar es que, del total de rechazos el 40% corresponde a rechazos gruesos y pesados, los cuales son eliminados en las primeras etapas de limpieza y preparación de la pasta (ver diagrama de proceso) y que, el otro 60% restante corresponden a rechazos finos y ligeros, eliminados en la limpieza de aproximación de la máquina de papel (sección cuba máquina). Además, la consistencia de ambos rechazos alcanza el 45%. (IPPC, 2006).

Así, en base a esta información, los supuestos y los valores de consistencia en las múltiples etapas del proceso productivo, es posible realizar los balances de masas correspondientes. Esto, con el fin de, determinar todas las masas de aguas que circulan por el sistema productivo y el sistema de regeneración.

A continuación, se exponen tablas con algunos de los balances de masas realizados, los demás se encuentran en la sección de anexos.

Tabla 29: Balance de masa en volumen control de ecualizador de agua turbia. Fuente: elaboración propia.

VC	Detalle	Valor [t/h]	Ent/Sal
Depósito de Agua Turbia	Agua turbia de deshidratación pasta	721,04	Ent
	Agua turbia de deshidratación de lodos y rechazos	7,23	Ent
	Agua turbia recirculada	485,51	Sal
	Agua turbia a ElectroDAF	242,76	Sal

Tabla 30: Balance de masa en volumen control de estanque de AR EDAF y manifold pulper. Fuente elaboración propia.

VC	Detalle	Valor [t/h]	Ent/Sal
Estanque AR EDAF y manifold Pulper	Agua regenerada ElectroDAF	241,83	Ent
	Agua clara a Estanque AR EDAF	70,53	Ent
	Agua turbia recirculada	485,51	Ent
	Agua Pulper	797,87	Sal

Tabla 31: Balance de masa en volumen control de ecualizador de aguas claras. Fuente: elaboración propia.

VC	Detalle	Valor [t/h]	Ent/Sal
Ecualizador de Aguas claras	Agua clara a Estanque Agua Clara	3275,78	Ent
	Agua clara a RC1	3078,73	Sal
	Agua sello	30,78	Ent
	Agua clara a Estanque AR EDAF	70,53	Sal
	Agua clara a UF	157,31	Sal

Tabla 32: Balance de masa en volumen control de estanque AR UF. Fuente: elaboración propia.

VC	Detalle	Valor [t/h]	Ent/Sal
Estanque de AR UF y manifold Agua fresca	Agua Regenerada UF	152,59	Ent
	Agua Rociadores	153,91	Sal
	Agua de sello	30,78	Sal
	Requerimiento agua fresca	32,10	Ent

Se presentan estos volúmenes de control (VC), debido a que contienen los flujos másicos de las aguas regeneradas correspondientes a las distintas tecnologías de tratamiento. Además, se puede observar el flujo másico de agua fresca requerida por el sistema, en cual equivale a $32{,}10[t/h]$. Si se considera una temperatura de ingreso de $20[°C]$, con un densidad de $998[kg/m^3]$, es posible calcular el caudal de ingreso de agua fresca mediante la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \tag{4}$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{agua\ fresca} \approx 32{,}17 \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

Considerado una producción diaria de $750[ADt]$, es decir $31{,}25[ADt/h]$, es posible calcular el volumen de consumo de agua fresca por tonelada producida. Así, mediante la propuesta de mejora se tiene que:

$$V_{agua\ fresca} \approx 1{,}03 \left[\frac{m^3}{ADt}\right]$$

Comparando este valor, con el consumo promedio de plantas actuales que producen papeles y cartones de embalaje, el cual tiene un valor de $8{,}5 \left[\frac{m^3}{ADt}\right]$, se tiene que este alcanza el 12% del valor promedio. Es decir, la disminución del consumo de agua fresca que se logra, mediante la

implementación de la presente propuesta de mejora tecnología sobre el sistema de tratamiento y reutilización de aguas, alcanza el 88%.

A pesar de contar con un proceso de producción “0 riles” en condiciones normales de operación, el sistema posee pérdidas de aguas. Estas, se deben a la evaporación del agua en la máquina de papel, la humedad en el producto terminado y el agua contenida en los lodos y rechazos deshidratados. A continuación, se muestra el aporte porcentual de las pérdidas de aguas en el sistema.

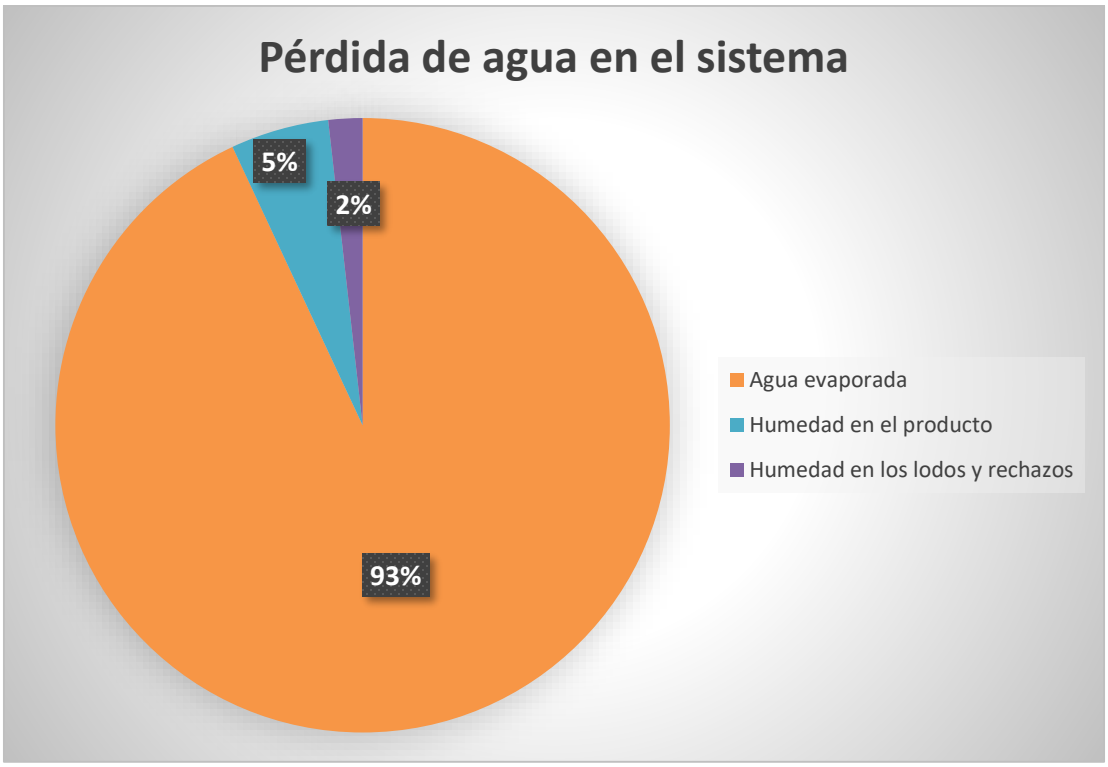


Figura 28:Gráfico circular de pérdidas del sistema de aguas del proceso de producción de papeles y cartones de embalaje. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, el mayor porcentaje de pérdida de agua del sistema se produce por evaporación durante el proceso de secado en la máquina de papel. Así, si se quisiera disminuir aún más el consumo de agua fresca, los esfuerzos deben enfocarse en someter al aire con vapor húmedo a un proceso de refrigeración, con el fin de que condense el agua que se encuentra en él y así poder recuperarla.

Por otro lado, con el objetivo de validar los resultados obtenidos, provenientes de los balances de masa realizados en cada uno de los equipos, es que se considerar tres grandes volúmenes control; el de proceso, el del sistema de regeneración de agua pasta y el del sistema de regeneración de la máquina de papel (los que se pueden observar en el diagrama de proceso). En cada uno de estos volúmenes de control se tiene que cumplir la siguiente relación.

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sal} \tag{5}$$

Al realizar esto, se observa que todos los sistemas se encuentran equilibrados, dado que la sumatoria de las entradas es equivalente a la sumatoria de las salidas.

3.4. Dimensionamiento del sistema hidráulico

En la presente sección se realiza el cálculo del sistema hidráulico del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Este, considera las diferentes bombas utilizadas para el transporte de las aguas de los sistemas de regeneración, las características de las tuberías empleadas por el sistema y el volumen requerido por los estanques ecualizadores de aguas contaminadas y los de almacenamiento de aguas regeneradas. Además, se consideran los instrumentos y unidades de medición y control de parámetros de interés del sistema del sistema de regeneración.

3.4.1.Cálculos del sistema de transporte de aguas

Para el diseño del sistema hidráulico de la propuesta se consideran 16 bombas, las cuales cumplen la función de transportar el fluido desde una determinada estación del proceso a otra. Los diversos caudales del sistema están determinados en base a los balances de masa realizados en cada uno de los equipos y por la ecuación (4), la cual relaciona el flujo másico con el flujo volumétrico (caudal) mediante la densidad del agua, variable que depende de la temperatura.

Sin embargo, para dimensionar la bomba que se requiere en cada situación en particular, es necesario contar con la presión de bombeo. La presión bombeo está determinada por la siguiente ecuación. (White, 2008).

$$p = \rho * g * h_b \tag{6}$$

Donde, ρ es la densidad del fluido, g es la aceleración de gravedad y h_b es la altura de la bomba. Para determinar h_b es necesario resolver la ecuación de energía. Así, la ecuación de energía que modela el transporte de flujo viscoso estacionario en una tubería mediante una bomba desde un punto a otro es la siguiente: (White, 2008).

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{{v_1}^2}{2g} + z_1 + h_b = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{{v_2}^2}{2g} + z_2 + h_f + \sum h_m \tag{7}$$

Donde, v es la velocidad, z es la altura, h_f es la pérdida de carga debido a la fricción del fluido con la tubería y h_m son las pérdidas de carga menores o localizadas, las cuales se deben a válvula, codos, ensanchamientos, etc. Los subíndices $_1$ y $_2$ indican el punto inicial y final que se realiza el

transporte respectivamente. Las pérdidas de carga es posibles calcularlas mediante la siguiente ecuación: (White, 2008).

$$h_{pérdida\ de\ carga} = h_f + \sum h_m = \frac{v^2}{2g}\left(\frac{fL}{d} + \sum K\right) \tag{8}$$

Donde f es el coeficiente de fricción de Darcy, L es el largo de la tubería, d el diámetro interno de la tubería y K el coeficiente de pérdidas localizadas. Los valores del coeficiente K dependen del componente o la geometría a la cual es sometido el flujo y son posibles encontrarlos en la literatura, mientras que el coeficiente de fricción f para flujos turbulentos es posible calcularlo mediante la siguiente ecuación. (White, 2008).

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2{,}0 \log\left(\frac{\varepsilon/d}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{Re_d f^{1/2}}\right) \tag{9}$$

Donde, ε es la rugosidad relativa y Re_d el número de Reynolds, el cual se determina por la siguiente ecuación: (White, 2008).

$$Re_d = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{10}$$

Donde, μ es la viscosidad dinámica. El resto de los valores son la densidad, la velocidad y el diámetro interno de la tubería respectivamente.

En consecuencia, mediante las ecuaciones anteriormente expuestas es posible calcular la altura requerida de la bomba y con esto la presión de bombeo. Contando con la presión y el caudal de la bomba, es posible calcular la potencia requerida por esta para efectuar el transporte del fluido desde un punto al otro. Esta se calcula mediante la siguiente ecuación: (White, 2008).

$$P = p * Q \tag{11}$$

Donde, P es la potencia, p es la presión y Q el caudal. Así, en base a las ecuaciones anteriormente expuestas, se realiza la base de cálculo del sistema transporte hidráulico, el cual está compuesto por bombas y tuberías. Cabe mencionar que, cada sección de transporte se considera un determinado sistema de bombeo, el cual considera la bomba que se encuentra en este y las características de la tubería (material, diámetro y largo), identificándose como "*Pn"* siendo *n* el número correspondiente al sistema de bombeo (ver diagrama de proceso). El material considerado para las tuberías, como también para algunos componentes interiores de las bombas, es acero inoxidable *AISI 316*, con el fin de evitar problemas de corrosión en el sistema. (Perry, 1994). A continuación, se exponen los valores calculados más relevantes para el sistema, la tabla completa de cálculo se incluye en la sección de anexo.

Tabla 33:Cálculo del dimensionamiento de tuberías y bombas del sistema hidráulico de la propuesta. Fuente: elaboración propia.

Sistema	N° Bombas	$DN\ [in]$	$L\ [m]$	$v\ [m/s]$	$Re\ [-]$	$Q[m^3/h]$	$p\ [bar]$	$P\ total\ [kW]$
P1	1	1	10	0,98	43.279	1,96	0,49	0,03
P2	1	8	30	2,09	705.455	243,43	1,28	8,65
P3	1	10	50	2,66	1.123.806	486,85	1,48	20,03
P4	1	8	50	2,09	702.776	242,50	1,30	8,78
P5	1	14	100	2,56	1.420.134	805,93	2,26	50,56
P6	4	14	30	2,59	1.947.792	813,14	1,40	126,14
P7	4	14	30	2,66	2.003.647	836,46	1,42	132,10
P8	4	14	20	2,65	1.723.719	831,42	1,22	112,64
P9	4	14	30	2,49	1.620.031	781,40	1,37	119,01
P10	1	4	50	2,60	520.221	76,96	1,40	3,00
P11	1	3	10	1,80	194.025	30,97	0,72	0,62
P12	1	6	35	2,28	484.757	152,94	0,88	3,75
P13	1	6	30	2,21	470.214	148,35	1,34	5,51
P14	1	3	20	1,80	194.025	30,97	1,05	0,90
P15	1	6	50	2,31	490.761	154,84	2,05	8,81
P16	1	3	50	2,17	152.336	37,26	1,52	1,57

Donde, DN corresponde al diámetro nominar en pulgadas (considerando en todos los casos un Schedule 40), L a la longitud de la tubería, v la velocidad, Re el número de Reynolds dentro de la tubería, Q el caudal, p la presión y P la potencia total del sistema de bombeo.

Cabe mencionar que, en base a los requerimientos de caudal y presión, el tipo de bomba a implementar, por la propuesta de mejora, en cada uno de los sistemas de bombeo, corresponde a la familia de las bombas centrífugas. Además, se tiene que el $Re > 4.000$, en consecuencia la suposición de flujo turbulento es acertada. (White, 2008).

En la misma línea de diseño del sistema, se tiene que la selección del diámetro de cada tubería, se realiza teniendo en consideración el límite de velocidad de las aguas en el interior de estas, el cual no debe sobrepasar los 3 $[m/s]$. (Perry, 1994).

3.4.2.Cálculos del sistema de almacenamiento de aguas

Para determinar el volumen adecuado que deben poseer los estanques ecualizadores de aguas contaminadas y los de aguas regeneradas, se realizan las siguientes consideraciones.

$$V_{estanque} = 2 * V_{min\,requerido} \quad (12)$$

Donde, $V_{min\,requerido}$ es el volumen de salida de cada estanque en una hora. Cabe mencionar que, debido a las consideraciones de flujo estacionario y conservación de la masa en cada uno de los volúmenes de control estudiados, la masa entrante al sistema por unidad tiempo es las misma que la que sale del mismo. Además, se tiene que los volúmenes de aguas presentes en las tuberías, son despreciables en comparación con el volumen establecido como mínimo requerido, por este motivo se desprecian en el cálculo de volumen para los estanques. Así, los volúmenes requeridos para cada estanque se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 34: Cálculo de dimensionamiento de los estanques de aguas del sistema hidráulico. Fuente elaboración propia.

Estanque	Volumen mínimo requerido [m^3]	Volumen estanque [m^3]
Ecualizador Pasta	730	1.460
Almacenamiento AR EDAF	320	640
Ecualizador Agua Clara	3.356	6.712
Almacenamiento AR UF	186	372

Donde *AR EDAF*, es la abreviación de Agua Regenerada por Electroflotación y *AR UF*, es Agua Regenerada por la unidad de Ultra Filtración.

3.4.3.Instrumentos y unidades de medición y control

Con el objetivo de medir y controlar los diferentes parámetros de interés del sistema es que se implementan instrumentos de medición presión y caudal en las diferentes tuberías del sistema hidráulico. Además, se implementan Unidades de Análisis de Aguas (UAA) en cada uno de los estanques ecualizadores y de almacenamiento que considera la propuesta.

Las UAA, permiten realizar muestreos de calidad de aguas cada cierto intervalo de tiempo, arrojando el resultado de parámetros críticos de calidad considerados por el sistema de regeneración, como lo son; DQO, SST, pH, conductividad, alcalinidad y dureza presentes en las aguas. (Ordóñez, 2011).

Los resultados de los muestreos realizados por las UAA son sometidos a cartas de control, con el objetivo de controlar las variables de interés antes expuestas. Así, el sistema se encuentra en control estadístico, considerando un comportamiento estable de los parámetros cuando estos obedecen a una distribución normal. (Fundametos de Calidad UTFSM, 2015).

En consecuencia, si los valores de estos parámetros de interés se encuentran dentro de los límites de control (límite superior y límite inferior) y descartando posibles “situaciones especiales”, quiere decir que el sistema presenta un comportamiento estable, donde la variabilidad que presenta el parámetro se considera “normal” o dentro de lo aceptable. Sin embargo, cuando

dichos parámetros sobrepasen los límites establecidos y se confirma que esto no obedece a una situación especial, el sistema entra en alerta, debiendo tomar decisiones pertinentes.

El presente modelo no establece los límites de control, quedando como un desafío propuesto a someter a estudio. Sin embargo, esta herramienta estadística se considera de gran utilidad para controlar los parámetros de calidad de las aguas, con el fin de que esta no repercuta en la calidad de los productos comercializados, ni afecte la vida útil de los equipos involucrados en el proceso de fabricación de estos.

3.5. KPI'S del sistema de regeneración de aguas

Los *KPI* (Key Performance Indicator) son factores críticos del desempeño de cualquier sistema u organización, los cuales, a partir de la medición de las variables de interés, facilitan la cuantificación del desempeño que presenta el sistema en base al objetivo deseado o establecido. (Fundametos de Calidad UTFSM, 2015).

Se tiene que el *KPI* primario del sistema, el cual permite determinar el desempeño global de este, se relaciona con el consumo de agua fresca (*AF*) por tonelada producida. Para determinar su valor, se identifican las siguientes variables.

$$VCA_{AF} = \frac{Volumen\ de\ Consumo\ en\ Ciclo\ Abierto}{Toneladas\ Producidas\ Diarias}\left[\frac{m^3}{ADt}\right] \tag{13}$$

$$VMD_{AF} = \frac{Volumen\ de\ Consumo\ Medido\ Diario}{Toneladas\ Producidas\ Diarias}\left[\frac{m^3}{ADt}\right] \tag{14}$$

$$VN_{AF} = \frac{Volumen\ de\ Consumo\ Nominal}{Toneladas\ Producidas\ Diarias}\left[\frac{m^3}{ADt}\right] \tag{15}$$

Donde, VCA_{AF} es el Volumen en Ciclo Abierto de consumo de Agua Fresca por tonelada métrica de pasta seca producida, VMD_{AF} es el Volumen Medido Diario de consumo de Agua Fresca por tonelada métrica de pasta seca producida y VN_{AF} corresponde al Volumen Nominal de consumo de agua fresca por tonelada métrica de pasta seca producida. Además, en base a estas variables, es posible determinar la variación o "delta" en el consumo de agua fresca al implementar la propuesta de mejora tecnológica.

$$\Delta_{Actual\ AF} = VCA_{AF} - VMD_{AF}\left[\frac{m^3}{ADt}\right] \tag{16}$$

$$\Delta_{Máximo\ AF} = VCA_{AF} - VN_{AF}\left[\frac{m^3}{ADt}\right] \tag{17}$$

Donde, $\Delta_{Actual\ AF}$ es la diferencia entre el consumo actual de aguas fresca, con la propuesta tecnológica implementada y funcionando, y el que se presenta en una operación bajo "ciclo abierto", antes de implementar la propuesta. Por otra parte, se tiene que, $\Delta_{Máximo\ AF}$, es la diferencia máxima en el consumo de agua fresca que se puede alcanzar con la mejora. Esta situación, se presenta cuando el sistema de regeneración de aguas se encuentra en condiciones óptimas de operación, alcanzando el valor nominal de consumo de agua fresca, correspondiente, en el caso particular, a $1{,}03\left[\frac{m^3}{ADt}\right]$.

En base a las variables anteriormente expuesta, se define el *KPI* primario del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, el cual está determinado por la siguiente ecuación:

$$KPI_{AF} = \left[\frac{VCA_{AF} - VMD_{AF}}{VCA_{AF} - VN_{AF}}\right] * 100\ \ [\%] \tag{18}$$

Así, cuando el sistema presenta un consumo de agua fresca por tonelada producida igual al nominal, el *KPI* primario del sistema de regeneración alcanza un rendimiento del 100%. Por el contrario, cuando se presenta un consumo de agua fresca por tonelada producida igual al que se tiene bajo un ciclo abierto (sin reutilización), el *KPI* primario del sistema alcanza un rendimiento del 0%.

El sistema de tratamiento y reutilización de aguas está diseñado para alcanzar condiciones nominales durante ciclos normales de operación. Sin embargo, se considera aceptable poseer un KPI_{AF} superior al 90%, ya que puede existir variabilidad en los procesos de deshidratación o producción de lodos, afectando el consumo de agua fresca del sistema productivo. Para valores bajo el 90%, es necesario investigar de forma inmediata las posibles causas que estén afectando el rendimiento del sistema de regeneración de aguas, con el fin de identificarlas y realizar acciones pertinentes que faciliten un funcionamiento aceptable de dicho sistema.

Por otra parte, cabe mencionar que, al momento de realizar los recambios de agua programados al sistema de producción, el *KPI* de consumo de agua fresca se verá afectado, alcanzando incluso valores negativos. Sin embargo, esta situación "especial" es el único momento donde es tolerable contar con el KPI_{AF} negativo.

El hecho de medir el desempeño del sistema permite tener conocimiento del estado en el cual este se encuentra y así, enfocar los esfuerzos para que este opere de manera óptima y de manera controlada. En base a esto, se proponen considerar otros *KPI* secundarios, con el objetivo de medir y controlar variables, estos se exponen a continuación:

- $KPI_{Calidad\ de\ Aguas}$: Busca medir y controlar la calidad de las diferentes aguas del sistema.
- $KPI_{Generación\ de\ Residuos}$: Busca medir y controlar la cantidad de residuos sólidos (lodos) generados por el sistema de regeneración de aguas.

- $KPI_{Disponibilidad\ del\ Sistema}$: Busca medir y controlar disponibilidad del sistema de tratamiento y reutilización de aguas.
- $KPI_{Recambio\ de\ Aguas}$: Busca medir y controlar el recambio programado de aguas en el sistema productivo.
- $KPI_{Vertidos\ Accidentales}$: Busca medir y controlar el agua eliminada por el sistema debido a vertidos accidentales.

Se observa que todos los *KPI* secundarios, presentados anteriormente, repercuten de manera directa e indirecta en el *KPI* primario del sistema (consumo de agua fresca). Es así, como cualquier anomalía que se presente, tanto en proceso productivo como en el sistema de tratamiento y reutilización de aguas, se verá reflejado en el KPI_{AF}, el cual gobierna el desempeño del sistema de aguas empleado por el sistema productivo.

CAPÍTULO 4:

4. Evaluación económica de la propuesta de mejora tecnológica

En el presente capítulo se realiza un estudio técnico-económico para la implementación de la propuesta de mejora tecnológica del sistema de tratamiento y reutilización de aguas.

Para esto, se consideran las distintas variables económicas que caracterizan al proyecto, cuantificando; los beneficios que este reporta, los costos de operación que presenta el sistema de regeneración y los costos de inversión requeridos por este. Además, se consideran los escudos fiscales (depreciación, intereses y pérdidas del ejercicio anterior) y el horizonte de tiempo en base al cual se evalúa el proyecto.

En base a las variables anteriormente descritas, se elabora un flujo de caja, el cual establece la relación tiempo-dinero y facilita la evaluación económica del proyecto. A partir del flujo de caja y la tasa de descuento, asociada al riesgo y el costo de oportunidad, se realiza el cálculo de los diferentes indicadores de rentabilidad, entre los cuales destacan *VAN*, *TIR* y *PAYBACK*. Estos indicadores, son fundamentales al momento de decidir entre una u otra alternativa de inversión. (Sapag & Sapag, 2008).

El cálculo determinístico de los indicadores de rentabilidad se complementa mediante un estudio de sensibilidad, el cual considera la variabilidad de que poseen las diferentes variables de entrada del estudio económico. El hecho de considerar la variabilidad del modelo económico permite tomar decisiones con mayor seguridad. (Sapag & Sapag, 2008).

Para realizar el estudio estocástico correspondiente, se utiliza el software Crystal Ball, el cual, mediante la definición de las variables de entrada en base a un determinado modelo probabilístico, permite realizar una simulación de distintos escenarios aleatorios (método de Montecarlo). En base a lo anterior, se obtiene una distribución de probabilidad asociada a la variable de estudio, específicamente el *VAN*, facilitando la toma de decisiones en base a un modelo sólido de probabilidad.

4.1. Cálculo de variables económicas del proyecto

La presente sección establece y cuantifica las variables económicas del proyecto, específicamente costos de inversión, costos de operación, beneficios económicos, depreciación y fuentes de financiamiento. Mediante dichas variables, se comienzo al estudio económico del proyecto, permitiendo posteriormente evaluar económicamente la propuesta de mejora tecnológica al sistema de tratamiento y reutilización de aguas.

4.1.1. Inversiones del proyecto (Activos Fijos e Intangibles y Capital de Trabajo)

Las inversiones efectuadas antes de la puesta en marcha del proyecto se pueden agrupar en tres tipos: activos fijos, activos intangibles y capital de trabajo. (Sapag & Sapag, 2008).

Las inversiones en activos fijos son todas aquellas que se realizan en los bienes tangibles que se utilizarán en el proceso de transformación de los insumos o que sirvan de apoyo a la operación normal del proyecto. Constituyen activos fijos, entre otros, los terrenos, las obras físicas (edificios industriales, sala de venta, oficinas administrativas, vías de acceso, estacionamientos, bodegas, etcétera), el equipamiento de la planta, oficinas y salas de venta (en maquinarias, muebles, herramientas, vehículos y decoración en general) y la infraestructura de servicios de apoyo (agua potable, desagües, red eléctrica, comunicaciones, energía, etcétera). Cabe mencionar que, para efectos contables, los activos fijos están sujetos a depreciación, la cual afectará el resultado de la evaluación por su efecto sobre el cálculo de los impuestos. (Sapag & Sapag, 2008).

Las inversiones en activos intangibles son todas aquellas que se realizan sobre activos constituidos por los servicios o derechos adquiridos, necesarios para la puesta en marcha del proyecto. Los principales ítems que configuran esta inversión son los gastos de organización, las patentes y licencias, los gastos de puesta en marcha, la capacitación, las bases de datos y los sistemas de información operativos. Los activos intangibles son susceptibles de amortizar, que al igual que la depreciación, afectarán el flujo de caja indirectamente por la vía de una disminución en la renta imponible y, por tanto, de los impuestos pagaderos. (Sapag & Sapag, 2008).

Por otra parte, la inversión en capital de trabajo constituye al conjunto de recursos necesarios, en la forma de activos corrientes, para la operación normal del proyecto durante un ciclo productivo de una determinada capacidad, entendiendo como ciclo productivo al proceso que se inicia con el primer desembolso para cancelar los insumos de la operación y termina cuando se venden los insumos, transformados en productos terminados, y se percibe el producto de la venta y queda disponible para cancelar nuevos insumos. para una capacidad y tamaño determinados. (Sapag & Sapag, 2008).

Específicamente, para la cuantificar la inversión en activos de la propuesta de mejora tecnológica, se utilizan las cotizaciones entregadas por los distintos proveedores de equipos y componentes, considerados para la implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, los cuales se detallan en la siguiente tabla junto con sus costos asociados.

Tabla 35: Inversión en activos del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Fuente: elaboración propia en base valores suministrados por proveedores de tecnologías.

Inversión en Activos	***[USD]***
ElectroDAF	*$ 1.500.000*
Unidad de Ultra Filtración	*$ 1.500.000*
Filtro de Discos	*$ 500.000*
Unidad de Deshidratación	*$ 100.000*
Bombas	*$ 165.000*
Válvulas	*$ 25.000*
Tuberías	*$ 40.000*
Ecualizadores y Almacenamiento	*$ 200.000*
Unidades de Medición y Control	*$ 30.000*
Sistema de Limpieza CIP (Clean In Place)	*$ 80.000*
Montaje y Obras Civiles	*$ 30.000*
Capacitaciones	*$ 8.000*
Total	***$ 4.178.000***

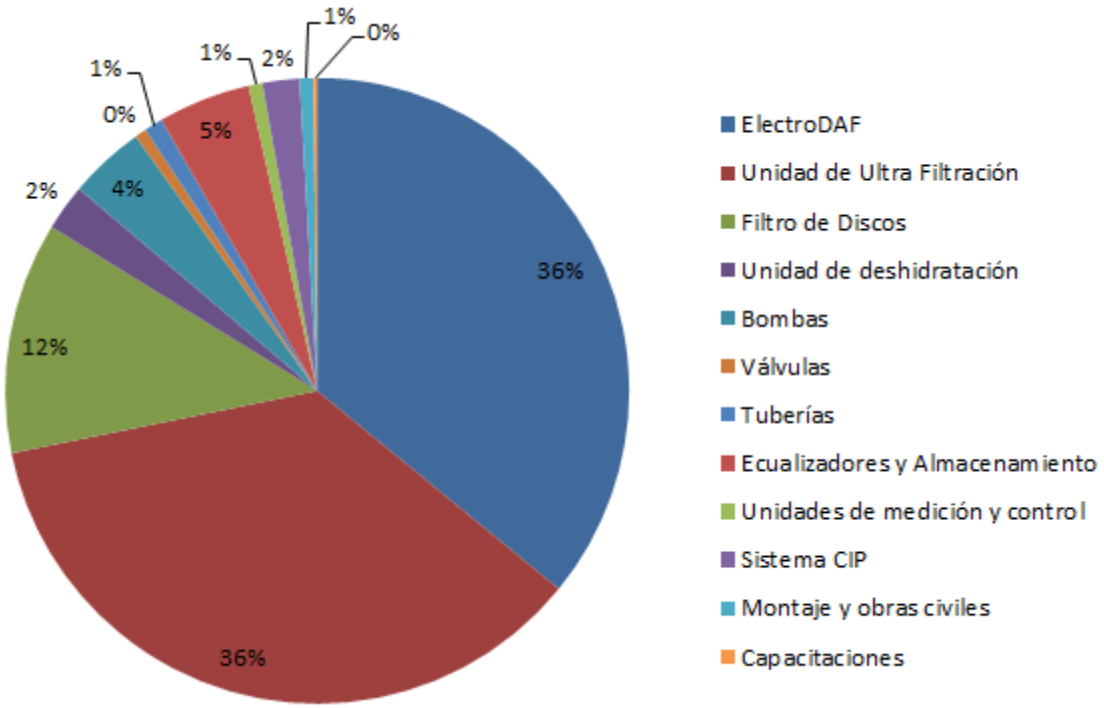


Figura 29: Gráfico circular con el aporte porcentual de cada uno de los componentes considerados en la inversión del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Fuente elaboración propia.

Como es de esperar, los equipos principales del sistema de regeneración de aguas, el ElectroDAF, la Unidad UF y el Filtro de Discos, constituyen el 84% de la inversión requerida para

la implementación de la propuesta. A estos le siguen los sistemas de almacenamiento, bombeo, deshidratación y limpieza respectivamente.

Para la estimación del capital de trabajo el método de periodo de desfase, el cual consiste en determinar la cuantía de los costos de operación que debe financiarse desde el momento en que se efectúa el primer pago por la adquisición de la materia prima hasta el momento en que se recauda el ingreso por la venta de los productos, que se destinará a financiar el periodo de desfase siguiente. Este, se calcula mediante la siguiente ecuación: (Sapag & Sapag, 2008).

$$CT = \frac{CA}{365} * n_d \tag{19}$$

Donde, CT es el Capital de Trabajo, CA el Costo Anual y n_d el número de días de desfase. Este método manifiesta la deficiencia de no considerar los ingresos que se podrían percibir durante el periodo de recuperación, con lo cual el monto así calculado tiende a sobrevaluarse, castigando a veces en exceso el resultado de la evaluación del proyecto. Sin embargo, sigue siendo un buen método para proyectos con periodos de recuperación reducidos o estudios de pre-factibilidad. (Sapag & Sapag, 2008).

El costo operacional anual alcanza los $641.898\ [USD]$ (ver siguiente sección), mientras que el ciclo productivo para el método de desfase se considera mensual (30 días de desfase). Así, el capital de trabajo requerido para la implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas alcanza los $52.759\ [USD]$.

4.1.2. Costos operacionales

Son los costos en los cuales debe incurrir una organización para mantener operativo y en buen estado su ciclo productivo. A su vez, los costos operacionales pueden clasificarse según su atribución, en directos, indirecto y gastos generales, o según volumen, en fijos o variables. (Sapag & Sapag, 2008).

Según el volumen de producción se tiene que, los costos fijos totales, son costos que se deberán pagar en un periodo determinado, independientemente de su nivel de producción (arriendo de bodegas, algunas remuneraciones, seguros de máquina, etc.). Por su parte, los costos variables totales, son los pagos que dependen del nivel de producción (costo de los envases, mano de obra directa, materias primas, etc.). La suma de ambos costos dará el costo total del periodo. (Sapag & Sapag, 2008).

Particularmente, para la cuantificación de los costos operaciones en los cuales se debe incurrir, se tiene que estos se determinaron en base a información entregada por los proveedores, valores típicos para estas tecnologías, los cuales son extraídos en base al Documento de Referencia de las Mejores Técnicas Disponibles (IPPC, 2006), y el costo promedio del kWh para la ciudad de Santiago, Chile. Lo anterior se resume en las siguientes tablas.

Tabla 36: Costos operacionales del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, considerados en base a información suministrada por proveedores, documentación técnica IPPC, 2006 y el costo promedio del kWh para la ciudad de Santiago, Chile.

Costos Fijos	$[USD/año]$
Gastos Generales	*$ 20.000*
Total Costos Fijos	***$ 20.000***
Costos Variables	$[USD/año]$
Floculante	*$ 47.450*
Energía	*$ 490.638*
Mano de Obra	*$ 20.000*
Mantenimiento	*$ 30.829*
Limpieza CIP	*$ 32.980*
Total Costos Variables	***$ 621.898***
Total Costos Operacionales	***$ 641.898***

Para los costos fijos de la presente propuesta, sólo consideran gastos generales, los cuales están más bien orientados a programas de investigación y desarrollo para la mejora del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Por otra parte, para costos variables, se consideran los principales servicios y suministros para una correcta operación del sistema de regeneración de aguas. A continuación, se expone un gráfico porcentual de los costos dependientes del volumen de producción, detallando el aporte porcentual de cada una de las variables consideradas.

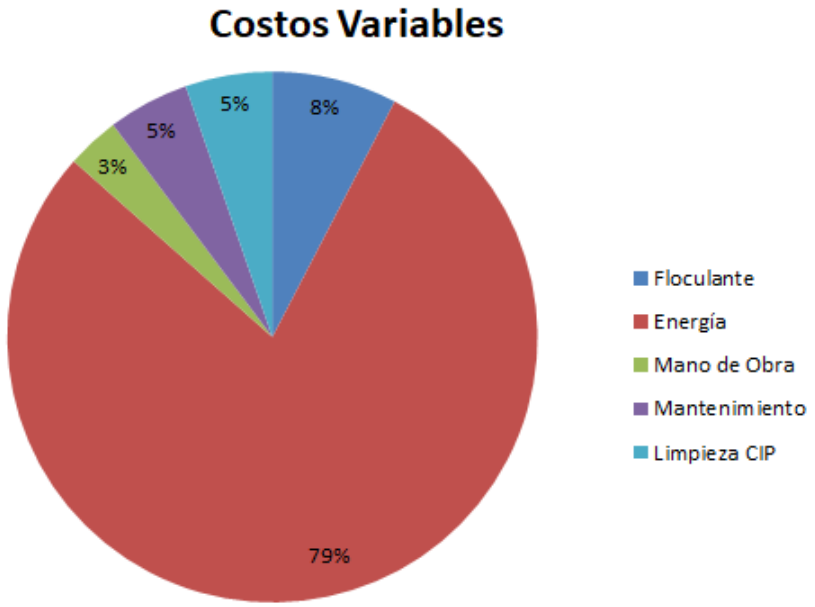


Figura 30:Gráfico circular con el aporte porcentual de los costos variables considerados en el sistema. Fuente: elaboración propia.

El total de costos variables alcanza los 621.898[USD], prácticamente el 80% de ellos se debe a los costos por energía eléctrica, en segundo lugar, se tienen los costos incurridos en la compra de floculantes para el ElectroDAF, la cantidad requerida y los valores fueron suministrados por los proveedores de las tecnologías. Por su parte, los costos asociados a la limpieza CIP y los costos de mantenimiento alcanzan el 5%, cada uno de ellos, y su estimación, fue realizada en base a información extraída del Documento de Referencia de las Mejores Técnicas Disponibles (IPPC, 2006). Finalmente, el costo variable de menor aporte es el de Mano de Obra, donde se consideraron salarios anuales para dos operadores, encargados del sistema de tratamiento y reutilización de aguas.

Debido al gran aporte de los costos energéticos en el total de los costos variables, se expone su detalle con el fin de identificar el consumo de los diferentes equipos que considera el sistema.

Tabla 37: Consumo energético de las tecnologías consideradas en la propuesta de mejora. Fuente: elaboración propia en base a información suministradas por proveedores y cálculo de potencias.

Equipos	$[kWh]$	$[kWh * año]$
ElectroDAF	*160*	*175.200*
Unidad UF	*150*	*1.314.000*
Unidad de Deshidratación	*30*	*262.800*
Filtro de Discos	*60*	*525.600*
Sistema de Bombeo	*300*	*2.628.000*
Sistema CIP	*30*	*780*
Total energía	***730***	***4.906.380***

Como se puede observar el sistema de bombeo es el que tiene mayor incidencia en el consumo de energía del sistema. Este tiene en consideración totas las bombas identificadas en el diagrama de proceso, exceptuando los sistemas *P5, P6, P9, P14 y P15* (ver plano diagrama de proceso). Esto se debe a que estos sistemas de bombeo son propios del proceso productivo, independiente si el agua es regenerada o fresca, por los que no se consideran en los costos de energía de la presente propuesta. Cabe mencionar que, esta consideración sólo se hace en los costos operacionales y no en los de inversión, ya que se considera de igual manera su compra. Lo anterior, se realiza con el fin de contar con dispositivos stand-by y, así, aumentar la confiabilidad del sistema de aguas, lo que conlleva a un aumento también de su disponibilidad.

Las horas de funcionamiento de los distintos equipos varían según los requerimientos de estos. Específicamente, para la Unidad UF, la Unidad de Deshidratación, el Filtro de Discos y el Sistema de Bombeo se requiere una operación continua de ellos, es decir se consideraron anualmente 8.760 [hr], esto se debe a las funciones que dichos equipos realizan. Por su parte, para el ElectroDAF y el Sistema CIP a nivel de proceso en general, se tiene que presentan funcionamiento intermitente, el cual dependerá del grado de contaminación de aguas del circuito de preparación

pasta y los recambios de agua del sistema respectivamente. Inicialmente se considera una operación diaria de alrededor de $3[hr]$ para el ElectroDAF y de una vez cada dos semanas del Sistema CIP.

A continuación, se expone un gráfico circular con el detalle del aporte porcentual de cada subsistema con respecto al consumo energético.

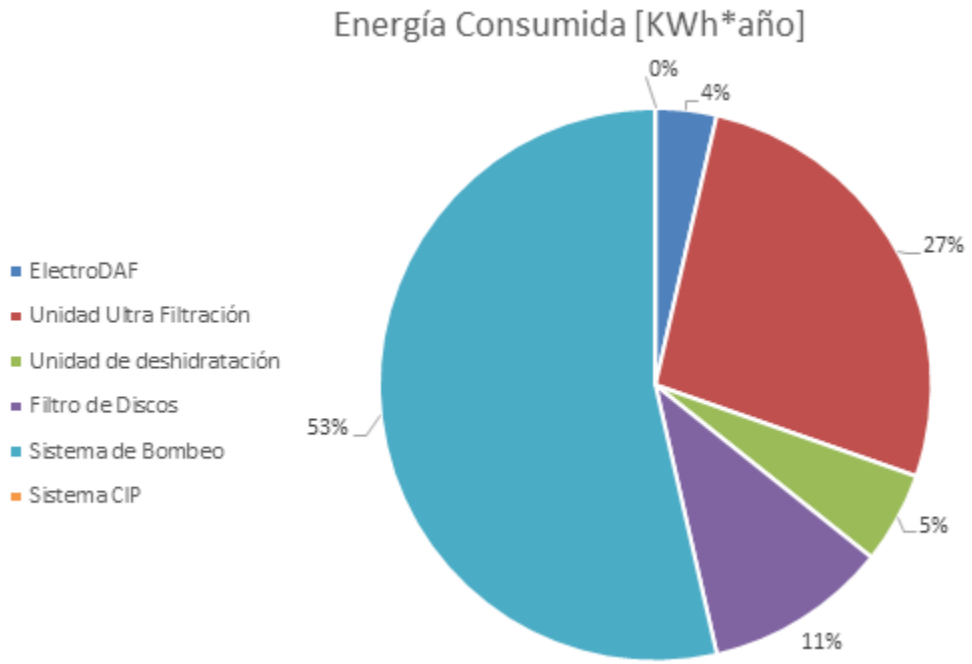


Figura 31: Gráfico circular con el aporte porcentual del consumo de energía de los equipos considerados en el sistema de regeneración. Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Beneficios financieros del proyecto

Para el cálculo de los beneficios económicos, se considera el ahorro equivalente a los costos operacionales asociados a un proceso habitual de tratamiento de aguas residuales de fin de línea, el cual está compuesto por un tratamiento primario físico-químico de flotación y un tratamiento secundario de lodos activados. Además, se considera el ahorro equivalente a los costos asociados a un pretratamiento de agua fresca, considerando una unidad de osmosis inversa.

Los volúmenes de agua utilizados para la estimación de los costos están asociados a un consumo promedio de agua fresca, es decir a $8{,}5\left[{m^3}/{ADt}\right]$,correspondientes a un valor de $6.240\left[{m^3}/{día}\right]$ de tratamiento de agua fresca y a $5.520\left[{m^3}/{día}\right]$ a tratar en la planta de riles. La diferencia en el volumen de agua a tratar, se debe a que se evaporan prácticamente $30[m^3]$ en la máquina de papel. Cabe mencionar que, estos valores corresponden al mismo volumen de

producción considerado por la propuesta de mejora, equivalentes a producción diaria de $750[ADt]$.

A continuación, se exponen los costos asociados al tratamiento de los efluentes del proceso (riles) para el volumen de producción establecido.

Tabla 38: Costos asociados al tratamiento de efluentes provenientes de una papelera con una producción diaria de 750[ADt] en base a un tratamiento primario físico-químico y uno secundario por lodos activados. Fuente: elaboración propia.

Variables económicas consideras en el tratamiento de Riles		$[USD/año]$
Coagulante	*$*	*58.867*
Floculante	*$*	*49.056*
Energía Planta Riles	*$*	*876.000*
Mantenimiento Planta Riles	*$*	*118.873*
Costo Total	***$***	***1.102.796***

La estimación de los costos energéticos y de mantenimiento, se realiza mediante el conocimiento del volumen de producción y horas de operación consultando el Documento de Referencia de las Mejores Técnicas Disponibles (IPPC, 2006) y considerando un valor promedio del KWh de electricidad para Santiago de Chile. Por su parte, el costo asociado al floculante y coagulante, como también su volumen de utilización, se obtiene por la información suministrada por los proveedores. En base a lo anterior, es posible calcular el costo unitario de tratamiento por metro cúbico, el cual alcanza los 0,54 $[USD/m^3]$, valor cercano al promedio de estas plantas de tratamiento. (Rodriguez, Botelho, & Clevo, 2008).

Por otra parte, se calculan los costos asociados a la disminución del consumo de agua fresca, lo que conlleva a un ahorro en los costos de tratamiento de esta. A continuación, se expone el ahorro que se logra en el tratamiento de osmosis inversa al implementar la propuesta de mejora tecnológica.

Tabla 39: Ahorro en los costos de tratamiento de agua fresca mediante osmosis inversa debido a la implementación de la propuesta de mejora tecnológica. Fuente: elaboración propia.

Variables de ahorro en el tratamiento Agua Fresca		$[USD/año]$
Energía Agua Fresca	*$*	*188.082*
Mantenimiento Planta Agua Fresca	*$*	*117.840*
Costo Total	***$***	***305.922***

Estos, se obtienen al calcular la disminución correspondiente del consumo eléctrico y costos asociados al mantenimiento del equipo de osmosis inversa, apoyándose en la información

suministrada por los proveedores y el Documento de Referencia de las Mejores Técnicas Disponibles (IPPC, 2006).

Así, considerando la disminución en los costos de tratamiento de efluentes como también al tratamiento de aguas fresca, es posible calcular los beneficios totales que se alcanza mediante la presente propuesta desarrollada. Estos, se exponen a continuación.

Tabla 40: Beneficios totales al implementar la propuesta de mejora tecnológica. Fuente: elaboración propia.

Beneficios		$[USD/año]$
Beneficio Tratamiento Riles	*$*	*1.102.796*
Beneficio Tratamiento Agua Fresca	*$*	*305.922*
Beneficio Total	*$*	*1.408.718*

Por otro lado, existen otros dos beneficios que deben considerarse para medir la rentabilidad de la inversión, pero que no constituyen recursos disponibles: la recuperación del capital de trabajo y el valor de desecho del proyecto. El capital de trabajo está constituido por un conjunto de recursos que, siendo absolutamente imprescindibles para el funcionamiento del proyecto (y, por tanto, no estar disponibles para otros fines), son parte del patrimonio del inversionista y por ello tienen el carácter de recuperables. Si bien no quedarán a disposición del inversionista al término del periodo de evaluación (porque el proyecto seguirá funcionando, en el mayor número de casos, después de ese periodo), son parte de lo que ese inversionista tendrá por haber hecho la inversión en el proyecto. (Sapag & Sapag, 2008).

Lo mismo ocurre con el valor de desecho del proyecto. Al evaluar la inversión, normalmente la proyección se hace para un tiempo inferior a la vida útil real del proyecto. Por ello, al término del periodo de evaluación deberá estimarse el valor que podría tener el activo en ese momento, ya sea suponiendo su venta, considerando su valor contable o estimando la cuantía de los beneficios futuros que podría generar desde el término del periodo de evaluación hacia adelante. La inversión que se evalúa no sólo entrega beneficios durante el periodo de evaluación, sino durante toda su vida útil. Esto obliga a buscar la manera de considerar esos beneficios futuros dentro de lo que se ha denominado valor de desecho. Al igual que para el capital de trabajo, el valor de desecho no está disponible para enfrentar compromisos financieros. Si bien es un recurso del inversionista, considerarlo como disponible podría hacer que deba venderse la maquinaria para pagar un préstamo. Por ello se considera como un beneficio no disponible pero que debe valorarse para determinar la rentabilidad de la inversión, ya que es parte del patrimonio que el inversionista podría tener si invierte efectivamente en el proyecto. (Sapag & Sapag, 2008).

4.1.4. Escudos fiscales: Depreciación e intereses de financiamiento

Los escudos fiscales son gastos contables que afectan la base impositiva. Entre estos de identifican la depreciación de los activos fijos, los intereses de corto y largo a pagar a las

instituciones de financiamiento y las pérdidas del resultado del ejercicio en el periodo anterior. Todas estas variables al ser declaradas en el flujo de caja permiten a las organizaciones reducir el pago de impuestos, ya disminuyen la utilidad bruta o antes de impuesto. (Sapag & Sapag, 2008)

- **Depreciación**

La depreciación es el mecanismo mediante el cual se reconoce el desgaste y pérdida de valor que sufre un bien o un activo por el uso que se haga de el con el paso del tiempo. Cuando un activo es utilizado para generar ingresos, este sufre un desgaste normal durante su vida útil que al final lo lleva a ser inutilizable. (Sapag & Sapag, 2008).

El presente proyecto se considera el método contable de depreciación lineal de los activos fijos. A continuación, se expone una tabla con los diferentes activos fijos que considera el proyecto, presentando su valor de inversión), su vida útil, su valor residual y su respectiva depreciación por periodo.

Tabla 41:Depreciación lineal de los equipos y componentes considerados por la propuesta de mejora, considerando un horizonte de evaluación de 20 años. Fuente elaboración propia en base a información de vida útil suministrada por proveedores.

Equipo	Inversión [USD]	Vida útil [años]	Valor residual [USD]	Depreciación [USD]
ElectroDAF	$1.500.000	25	$300.000	$48.000
Unidad de Ultra Filtración	$1.500.000	25	$300.000	$48.000
Filtro de Discos	$500.000	25	$100.000	$16.000
Unidad de deshidratación	$100.000	25	$20.000	$3.200
Bombas	$165.000	20	$0	$8.250
Válvulas	$25.000	20	$0	$1.250
Tuberías	$40.000	25	$8.000	$1.280
Ecualizadores y Almacenamiento	$200.000	25	$40.000	$6.400
Unidades de medición y control	$30.000	20	$0	$1.500
Sistema CIP	$80.000	25	$16.000	$2.560

El precio y la vida útil de los diferentes equipos son suministrados por los proveedores de tecnologías, mientras que el valor residual *(VR)* se calcula mediante la siguiente ecuación. (Sapag & Sapag, 2008).

$$VR = I - \left(\frac{I}{VU} * n\right) \quad (20)$$

Donde, I es la inversión por el activo, VU su vida útil y n el horizonte de evaluación del proyecto, el cual corresponde a 20 debido a las características del presente proyecto. En base al método de depreciación lineal, es posible determinar la depreciación de cada activo (D_0) mediante la siguiente ecuación. (Sapag & Sapag, 2008).

$$D_0 = \left(\frac{I - VR}{VU}\right) \tag{21}$$

Así, la depreciación total para cada periodo alcanza los $136.440\ [USD]$, afectando la base impositiva del proyecto.

- **Intereses de financiamiento**

El hecho de solicitar algún tipo de financiamiento tiene una repercusión inmediata en la base impositiva, disminuyendo el impuesto a pagar por la organización. Esto se debe a que se adquiere una "deuda", la cual tiene un determinado costo financiero respecto al principal, monto que se solicita, reduciendo la utilidad del ejercicio. (Sapag & Sapag, 2008).

Se tienen diversas fuentes de financiamiento, a través de instituciones como; fundaciones, leasing, organismos internacionales y estatales, o de generar capital a través de inversionistas, entrando al mercado de acciones o emitiendo bonos. (Sapag & Sapag, 2008).

La presente propuesta considera dos casos:

a) Se solicita financiamiento externo del 60% de la inversión a una institución crediticia (banco), con plazo a pagar de 15 años. La institución facilita financiamiento con una tasa de interés anual del 9%.
b) No se solicita ningún financiamiento externo, es decir todo el aporte de capital lo realizan los inversionistas.

En el caso a) se adquiere una deuda, lo cual tiene una repercusión directa sobre la utilidad bruta, disminuyendo debido a los intereses que se deben pagar por adquirir dicha deuda. La cuota (PMT) que se debe pagar debido al principal o "préstamo" solicitado (VP) se considera constante y está determinada por la siguiente ecuación. (Sapag & Sapag, 2008).

$$PMT = VP * \left[\frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}\right] \tag{22}$$

Donde, i es el interés anual del crédito y n la cantidad de años al cual es solicitado. Cabe mencionar que la ecuación (22) corresponde a una cuota vencida. (Sapag & Sapag, 2008). En base a esto, se genera la siguiente tabla de amortización.

Tabla 42:Cálculo de amortizaciones a cuota constante en base al financiamiento solicitado. Fuente: elaboración propia.

Periodo [años]	Principal $[USD]$	Amortización $[USD]$	Interés $[USD]$	Cuota $[USD]$
0	$2.506.800	-	-	-
1	$2.421.421	$85.379	$225.612	$310.991
2	$2.328.358	$93.063	$217.928	$310.991
3	$2.226.920	$101.439	$209.552	$310.991
4	$2.116.352	$110.568	$200.423	$310.991
5	$1.995.833	$120.519	$190.472	$310.991
6	$1.864.467	$131.366	$179.625	$310.991
7	$1.721.278	$143.189	$167.802	$310.991
8	$1.565.202	$156.076	$154.915	$310.991
9	$1.395.079	$170.123	$140.868	$310.991
10	$1.209.646	$185.434	$125.557	$310.991
11	$1.007.523	$202.123	$108.868	$310.991
12	$787.209	$220.314	$90.677	$310.991
13	$547.067	$240.142	$70.849	$310.991
14	$285.313	$261.755	$49.236	$310.991
15	$0	$285.313	$25.678	$310.991

El hecho de rebajar impuesto debido a que se cuenta con financiamiento externo no significa que esto siempre sea conveniente, resultando en ocasiones desfavorable para proyectos de muy bajo riesgo y utilidad neta baja. Para un financiamiento del 60% a 15 años y a una tasa de interés del 9% , se tiene que el total de intereses a pagar alcanza los $2.158.062[USD]$, prácticamente un 50% de la inversión, lo cual no resulta menor. Cabe mencionar que, al aumentar cualquiera de estas tres condiciones el monto a pagar por intereses aumenta sustancialmente, por este motivo al momento de solicitar financiamiento se debe estudiar los diferentes escenarios antes de tomar una decisión.

4.2. Flujo de caja y cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad

En base a las variables económicas del proyecto (determinadas anteriormente) se construye el flujo de caja, el cual permite establecer las relaciones tiempo-dinero y facilitar el cálculo de los indicadores de rentabilidad (Sapag & Sapag, 2008), con el objetivo de evaluar económicamente la implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Un extracto del flujo de caja se expone en el Anexo XII.

4.2.1 Tasa de descuento y horizonte de evaluación

Previo al cálculo de los indicadores de rentabilidad, es necesario establecer el horizonte tiempo y la tasa de descuento para evaluar económicamente la propuesta. El horizonte de tiempo corresponde a la cantidad de periodos totales que se evalúa el proyecto, particularmente la presente propuesta, se evalúa en base a un horizonte de tiempo de 20 años, lo cual se debe a las características del proyecto y la vida útil de las tecnologías que intervienen en él. Por su parte, la tasa de descuento, es el retorno mínimo que se le exige el proyecto, el cual depende del riesgo de este y el costo oportunidad con el cual se cuente. Así, el costo del capital propio (k_e) se puede calcular mediante el uso de la tasa libre de riesgo (R_f) más una prima por riesgo (R_p), en base a la siguiente ecuación. (Sapag & Sapag, 2008).

$$k_e = R_f + R_p \tag{23}$$

La tasa que se utiliza como libre de riesgo es generalmente la tasa de los documentos de inversión colocados en el mercado de capitales por los gobiernos. La prima por riesgo corresponde a una exigencia que hace el inversionista por tener que asumir un riesgo al optar por una inversión distinta a aquella que le reporta una rentabilidad asegurada. (Sapag & Sapag, 2008).

En base a información del Banco Central de Chile se estima que la tasa libre de riesgo es del 4%. Por otro lado, el proyecto en particular, se considera de bajo riesgo, debido a sus características, donde la prima por riesgo para esta clase de proyectos varía entre el 1% al 5% (Sapag & Sapag, 2008). Así, para la evaluación de la propuesta el costo de capital propio es:

$$k_d = 7\%$$

El hecho de solicitar financiamiento para cubrir parte de la inversión requerida, afecta la tasa de descuento. Para cuantificar la tasa de descuento con financiamiento (k_o) se utiliza el método *WACC* (Weighted Average Cost of Capital), el cual considera el costo de la deuda (k_d) después de impuestos y el costo del capital propio (k_e), calculándose en base a la siguiente ecuación. (Sapag & Sapag, 2008).

$$k_o = k_d * (1 - t) * CD + k_e * CP \tag{24}$$

Donde, t representa la tasa de impuestos, CD el capital de deuda o financiamiento y CP el capital propio.

Considerando un financiamiento del 60% del total de la inversión, con un costo por deuda del 9%, y una tasa de impuestos de 27%, impuesto de primera categoría para el año comercial 2018 (SII, 2018), se tiene que la tasa de descuento calculada en base al método *WACC* es:

$$k_o = 6{,}7\%$$

4.2.2. Indicadores de rentabilidad

En base a los supuestos ya establecidos es posible calcular los indicadores de rentabilidad, los cuales se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 43: Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Valor
Horizonte de evaluación [años]	20
Financiamiento externo [%]	60%
Tasa de descuento [%]	6,7%
VAN [USD]	$ 2.447.931
TIR [%]	20,65%
PAYBACK [años]	4,8

El *VAN* (Valor Actual Neto) es un indicador de riqueza, así entre mayor es su valor más rentable es el proyecto. Este indicador, es de los más utilizados al momento de tomar decisiones respecto a si es conveniente o no invertir capital en el proyecto en particular. Sin embargo, para esto necesario contar con más de una alternativa de inversión, ya que de lo contrario sólo significa un valor monetario. A pesar de esto, el hecho de sea mayor a cero, significa que el proyecto es rentable. Al aplicar este criterio, sí el *VAN* es igual a cero, indica que el proyecto renta justo lo que el inversionista exige a la inversión; si el resultado fuese, por ejemplo, 100 positivo, indica que el proyecto proporciona esa cantidad de remanente sobre lo exigido. Si el resultado fuese 100 negativo, debe interpretarse como la cantidad que falta para que el proyecto rente lo exigido por el inversionista. (Sapag & Sapag, 2008).

La *TIR* (Tasa Interna de Retorno) es la máxima tasa de descuento que el proyecto soporta para ser atractivo. Dicho de otro modo, representa la tasa de interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero, si todos los fondos para el financiamiento de la inversión se tomaran prestados y el préstamo (principal e interés acumulado) se pagara con las entradas en efectivo de la inversión a medida que se fuesen produciendo. El hecho de que la *TIR* sea mayor a la tasa de descuento, permite considerar que el proyecto es rentable (Sapag & Sapag, 2008), como lo es en la alternativa analizada.

Por otra parte, el *PAYBACK* es el tiempo que demora en recuperarse la inversión realizada, esto se produce en el periodo que los flujos netos acumulados pasan de ser negativos a positivos. La ventaja de la simplicidad de cálculo no logra contrarrestar los peligros de sus desventajas. Entre éstas cabe mencionar que el criterio ignora las ganancias posteriores al periodo de recuperación, subordinando la aceptación a un factor de liquidez más que de rentabilidad. Tampoco considera el valor del dinero en el tiempo, al asignar igual importancia a los fondos generados el primer año con los del año "*n*".(Sapag & Sapag, 2008).

En consecuencia, si bien estos indicadores permiten evaluar económicamente la propuesta y determinar si esta es rentable o no, se hace difícil realizar un análisis más profundo, ya que se requieren más alternativas de inversión, que poseen condiciones económicas similares, para determinar qué tan atractiva económicamente es la presente propuesta.

Al cambiar el horizonte de evaluación, los indicadores se ven afectados, como se observa en las siguientes tablas.

Tabla 44:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 30 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Valor
Horizonte de evaluación [años]	25
Financiamiento externo [%]	60%
Tasa de descuento [%]	6,7%
VAN [USD]	$ 3.225.547
TIR [%]	21,6%
PAYBACK [años]	4,7

Tabla 45:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 15 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Valor
Horizonte de evaluación [años]	15
Financiamiento externo [%]	60%
Tasa de descuento [%]	6,7%
VAN [USD]	$ 1.420.042
TIR [%]	18,46%
PAYBACK [años]	4,9

Como se puede observar, al aumentar el periodo de evaluación a 25 años, el proyecto teóricamente se hace más rentable. Por el contario, al disminuir al disminuirlo a 15 años, este se hace menos atractivo. De esto se infiere que, entre más se prolongue el horizonte de evaluación, el proyecto se hace más rentable, ya que más riqueza está generando. Sin embargo, hay que considerar que a más de 25 años es probable que las tecnologías aumenten su tasa de falla, aumentando los costos de mantenimiento, llegando incluso a la necesidad de realizar un recambio de las tecnologías. Por este motivo debe tenerse cautela al momento escoger un horizonte de evaluación mayor a la vida útil de las tecnologías.

Cabe mencionar que al comparar proyectos es necesario que ambos se evalúen en base a las mismas condiciones, es decir con la misma tasa de descuento y el mismo horizonte de tiempo. (Sapag & Sapag, 2008).

Por otro lado, al variar el financiamiento externo, manteniendo constante el costo del capital propio y horizonte de tiempo, se tienen los siguientes resultados.

Tabla 46:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y sin financiamiento externo. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Valor
Horizonte de evaluación [años]	20
Financiamiento externo [%]	0%
Tasa de descuento [%]	7%
VAN [USD]	$ 2.296.869
TIR [%]	13,4%
PAYBACK [años]	6,9

Tabla 47:Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y con un financiamiento externo del 100%. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Valor
Horizonte de evaluación [años]	20
Financiamiento externo [%]	100%
Tasa de descuento [%]	6,6%
VAN [USD]	$ 2.503.680
TIR [%]	382%
PAYBACK [años]	0,3

Al comparar estos indicadores, con los que se tenían en base a las condiciones iniciales, se infiere que el proyecto se hace más rentable entre mayor sea el nivel de endeudamiento, a pesar de la gran cantidad de intereses que genera el hecho de solicitar un crédito bancario. Así, con una estructura de deuda estable, lo más conveniente sería adquirir el mayor financiamiento posible, sin embargo, no siempre es posible o conveniente para las organizaciones sobrepasar un cierto nivel de endeudamiento, por lo que debe estudiarse cada caso particular.

4.3. Análisis estocástico de pronósticos y sensibilidad

Con el objetivo de considerar la variabilidad de las distintas variables económicas de entrada (supuestos) y como estas pueden afectar la rentabilidad del proyecto, es que se realiza un análisis de sensibilidad de la propuesta de mejora tecnológica, complementando el estudio de flujo de caja e indicadores de rentabilidad.

El hecho de considerar la variabilidad de las variables económicas, permite tomar decisiones sobre bases más sólidas, ya que se evalúan diferentes escenarios posibles, en base a la distribución de probabilidad que presenten las variables de entrada, no sólo uno, como se realizó en la sección anterior. (Sapag & Sapag, 2008).

El software utilizado para desarrollar el análisis de sensibilidad es Crystal Ball. Este, realiza la simulación de los distintos escenarios de forma aleatoria mediante el método de muestreo de Montecarlo, considerando las distribuciones de probabilidad de las variables de entrada. Así, es posible obtener un pronóstico del comportamiento de la variable de estudio, determinando la distribución de probabilidad que más se ajusta a dicho pronóstico. (ORACLE, 2018).

4.3.1. Definición de distribuciones de probabilidad de los supuestos económicos

A continuación, se definen las distribuciones de probabilidad que modelan el comportamiento de las variables de entrada del análisis económico del proyecto.

- **Inversión**

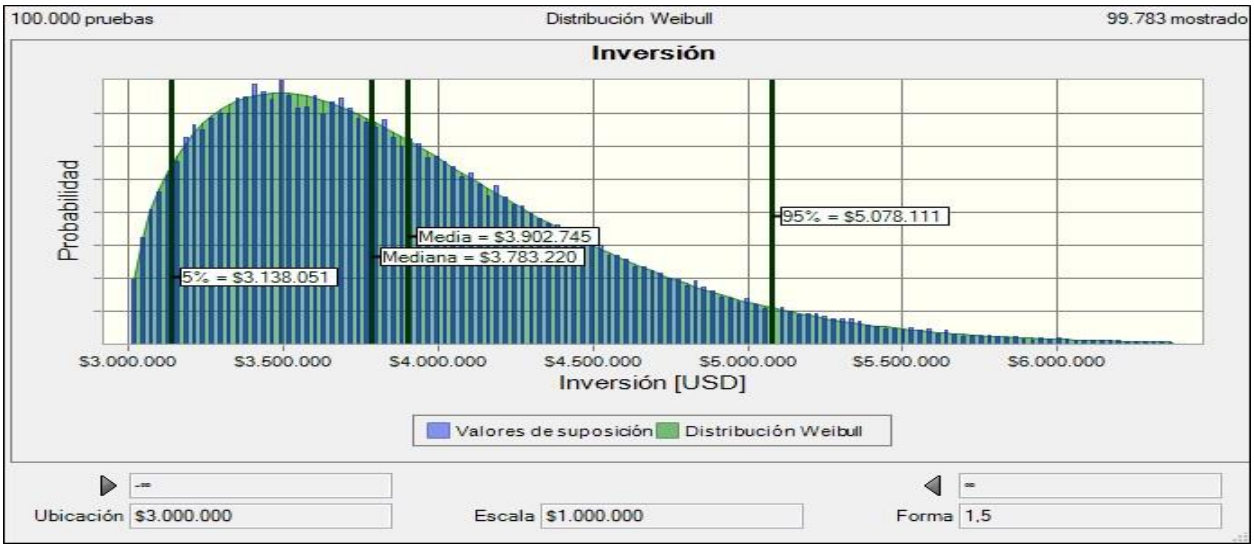


Figura 32:Distribución de probabilidad de la inversión. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

Para modelar la inversión del proyecto se considera una distribución de Weibull. Esta, se ubica en 3.000.000 [USD] ya que se considera que este es el valor mínimo que puede presentar la inversión. Se escoge un factor de forma de 1,5 con el objetivo que la distribución presente un sesgo positivo, existiendo una tendencia de que la inversión del proyecto sea menor a la media, la cual es menor a la inversión considerada inicialmente de 4.178.000[USD]. Esto se debe a que existe la posibilidad que el equipo de electroflotación haya estado sobredimensionado, bastando con dos celdas de electrocoagulación de las ocho consideradas inicialmente, sin alterar la calidad del producto elaborado ni los equipos del proceso productivo. Además, es posible que algunos componentes como estanques o válvulas e incluso algunas bombas puedan reutilizarse, disminuyendo así la inversión inicial.

- **Costos de operación**

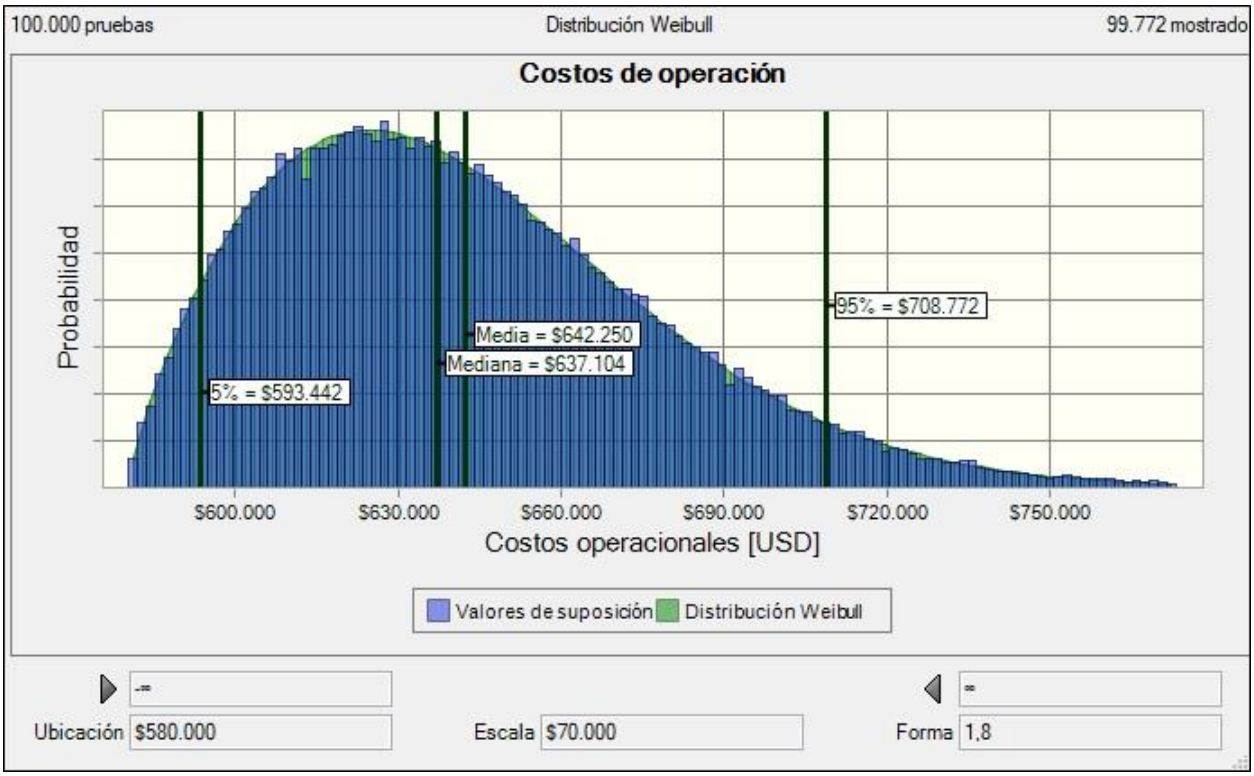


Figura 33:Distribución de probabilidad de los costos de operación. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

Los costos de operación se modelan en base a una distribución de Weibull. Esta, se ubica en 580.000 [USD] ya que se considera que este es el valor mínimo que pueden presentar los costos operacionales, los cuales se presentan al extender los ciclos entre tratamiento de la unidad de electroflotación (ubicada en el circuito de regeneración de preparación pasta) a cuatro días. Se escoge un factor de forma de 1,8 con el objetivo que la distribución presente un sesgo positivo, existiendo una tendencia de que los costos de operación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas sean menores a la media, cercana a los costos de operación considerados inicialmente

que alcanzan un valor de $641.898\ [USD]$. Esto se debe a que existe la posibilidad de extender aún más los ciclos entre tratamiento del circuito de regeneración de aguas de preparación pasta, específicamente el funcionamiento del equipo de electroflotación, lo que conlleva a que los costos de operación puedan disminuir, debido al menor consumo de floculante y energía, todo esto sin traer consecuencias negativas a la calidad del producto ni a los equipos involucrados en el proceso productivo.

- **Beneficios económicos (ingresos)**

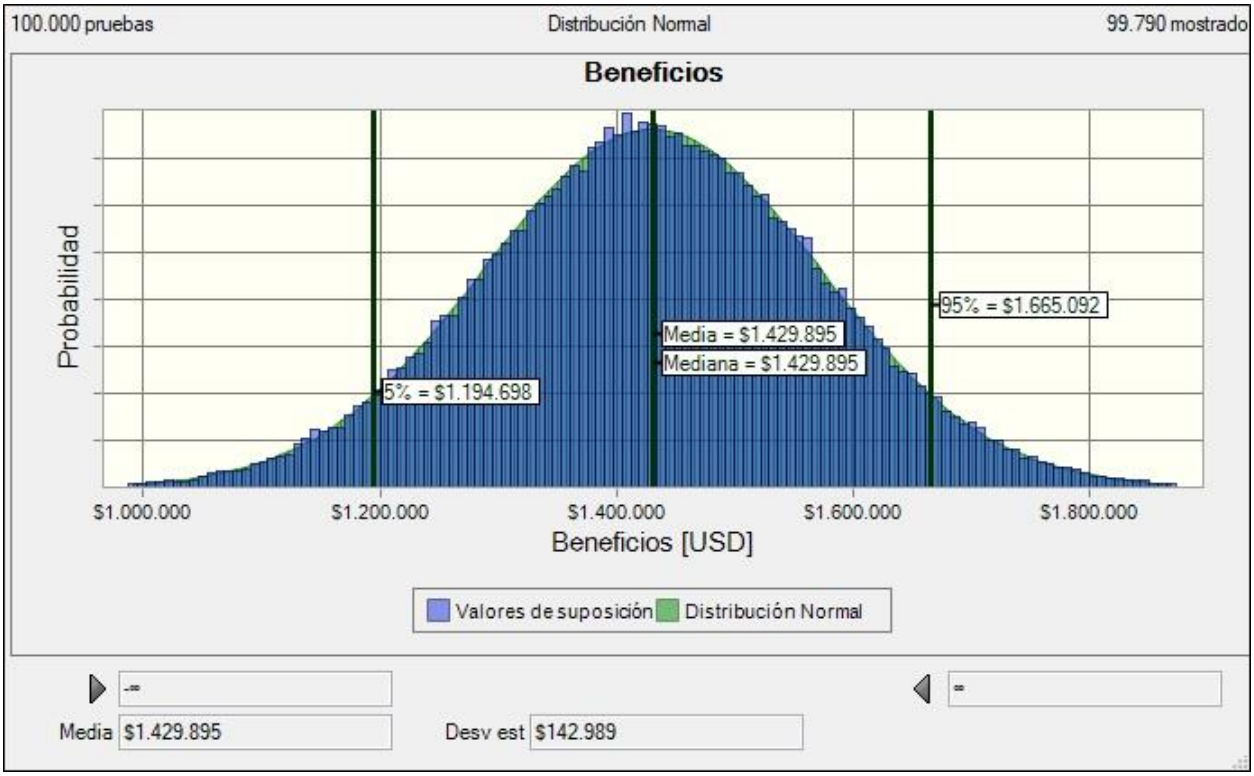


Figura 34:Distribución de probabilidad de los beneficios económicos. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

El beneficio económico se modela en base a una distribución normal, con una media de $1.429.895\ [USD]$, valor correspondiente a los beneficios esperados debido a la disminución de volumen tratado tanto en la planta fin de línea de riles, como en la planta de osmosis inversa de agua fresca.

Existe la posibilidad que los beneficios económicos sean menores a la media considerada, lo cual puede deberse a que el proceso productivo presente tecnologías eficientes en cuanto a la utilización del recurso hídrico, lo que conlleva a un menor volumen requerido de agua fresca y de efluentes por tonelada producida. Otra causa en la disminución de los beneficios, puede deberse a una falla funcional en el sistema de regeneración de aguas, trayendo como consecuencia un aumento en requerimiento de agua fresca por tonelada producida, lo que también repercutirá en el volumen de efluentes liberados por el proceso a la planta de riles.

Por el contrario, también existe la posibilidad que se presente un aumento de los beneficios económicos del proyecto, debido a que, al momento de realizar la estimación de estos, no se considera la potencia de bombeo de los efluentes del proceso a la planta de tratamiento. Esto, no deja de ser menor, ya que las energías consumidas por los sistemas de bombeo equivalen a una parte importante de los costos operacionales que se presentan en las plantas.

En base a lo anterior se considera que el 90% de los beneficios se encuentra entre $1.194.698\ [USD]$ y $1.665.092[USD]$.

- **Depreciación**

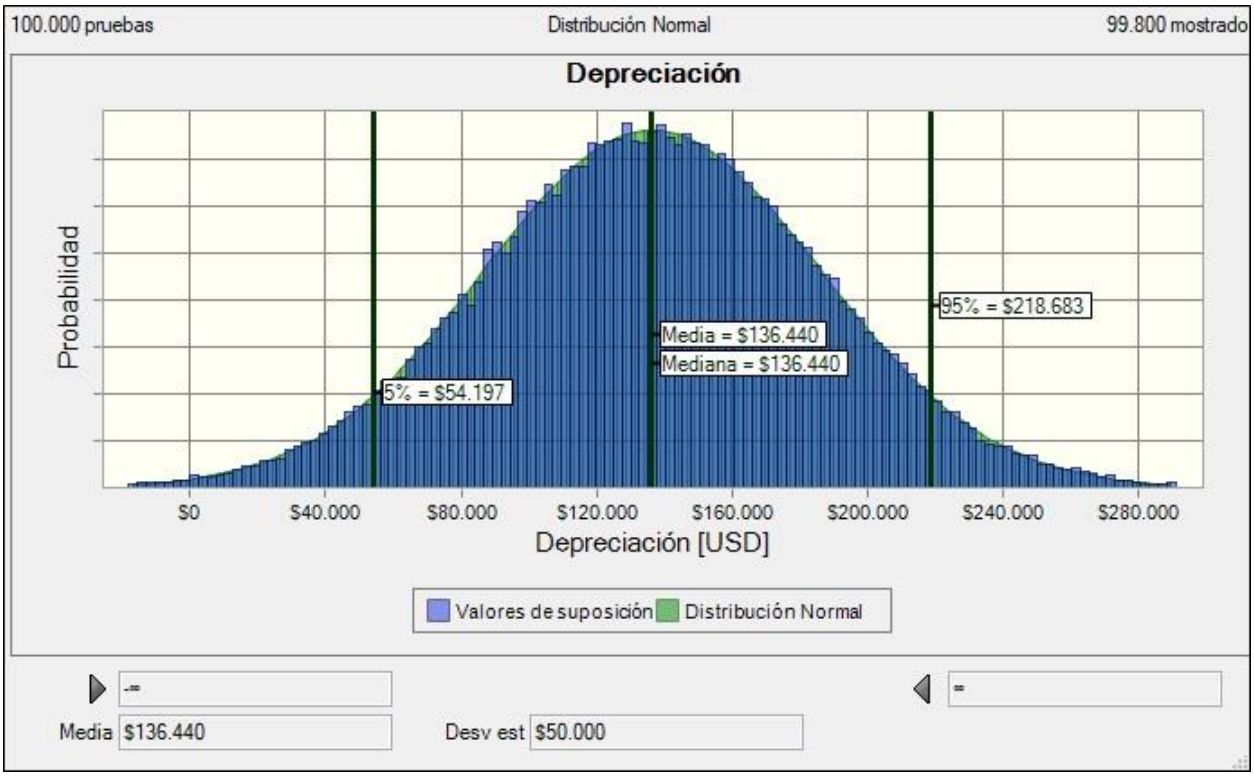


Figura 35: Distribución de probabilidad de la depreciación de los activos considerados por la propuesta de mejora. Fuente: elaboración propia en base al software Crytal Ball.

La depreciación se modela en base a una distribución normal, con una media de $136.440[USD]$. Esta, puede presentar desviaciones con respecto al valor más probable debido principalmente la variabilidad en la vida útil de los equipos y componentes involucrados en el sistema de tratamiento y reutilización de aguas. Específicamente, se considera una variabilidad de alrededor de ± 5 años en la vida útil de los activos para establecer los percentiles 5% y 95% correspondientes.

- **Tasa de descuento**

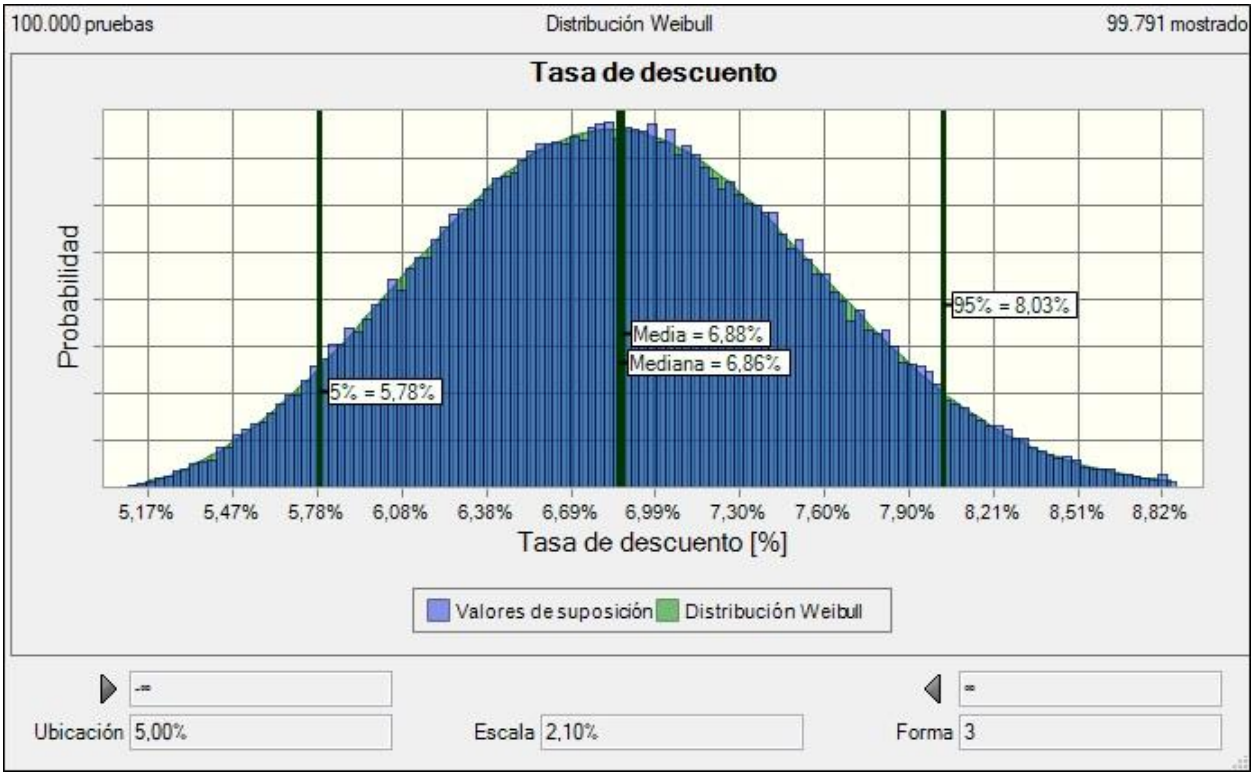


Figura 36: Distribución de probabilidad de la tasa de descuento en base a un financiamiento externo del 60%. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

La tasa de descuento del proyecto se modela en base a una distribución de Weibull, la cual se ubica en el 5%. Esto se debe a que a que la tasa libre de riesgo es del 4% y la prima por riesgo para proyectos de bajo riesgo, como lo es el presente, varía entre el 1% y el 5%, por lo que en teoría la tasa de descuento propia de la propuesta de mejora tecnológica puede variar entre el 5% y el 9%. Cabe mencionar que el hecho de solicitar financiamiento externo disminuye la tasa de descuento, pasando desde un valor más probable de 7% a 6,74%, con un financiamiento del 60%, calculado mediante el método *WACC*. En base a lo anterior, se asume que el 90% de los datos de tasa de descuento varían entre el 5,78% y el 8,03%, correspondientes a los percentiles 5% y 95% respectivamente.

4.3.2.Cálculo de pronósticos de rentabilidad

Al considerar la variabilidad de las diferentes variables económicas de entrada, en base a su correspondiente distribución de probabilidad, es posible determinar la distribución de probabilidad de la rentabilidad del proyecto (pronóstico), medida a partir del *VAN*. Esto, permite analizar este indicador como una variable estocástica que tiene asociada una cierta certeza de ocurrencia,

facilitando información más sólida al inversionista para que este tome una decisión. (Sapag & Sapag, 2008).

Con los supuestos ya definidos, es posible realizar una simulación, la cual tiene el objetivo de considerar múltiples escenarios aleatorios y distintos, en base al método de muestreo de Montecarlo. Así, para cada escenario se determina el *VAN*, generando una distribución de probabilidad del pronóstico de rentabilidad del proyecto. Particularmente para el estudio, se realizan 100.000 pruebas hasta con un nivel de confianza del 95%.

A continuación, se expone la distribución de probabilidad del *VAN* para un financiamiento del 60%, presentándose los siguientes resultados.

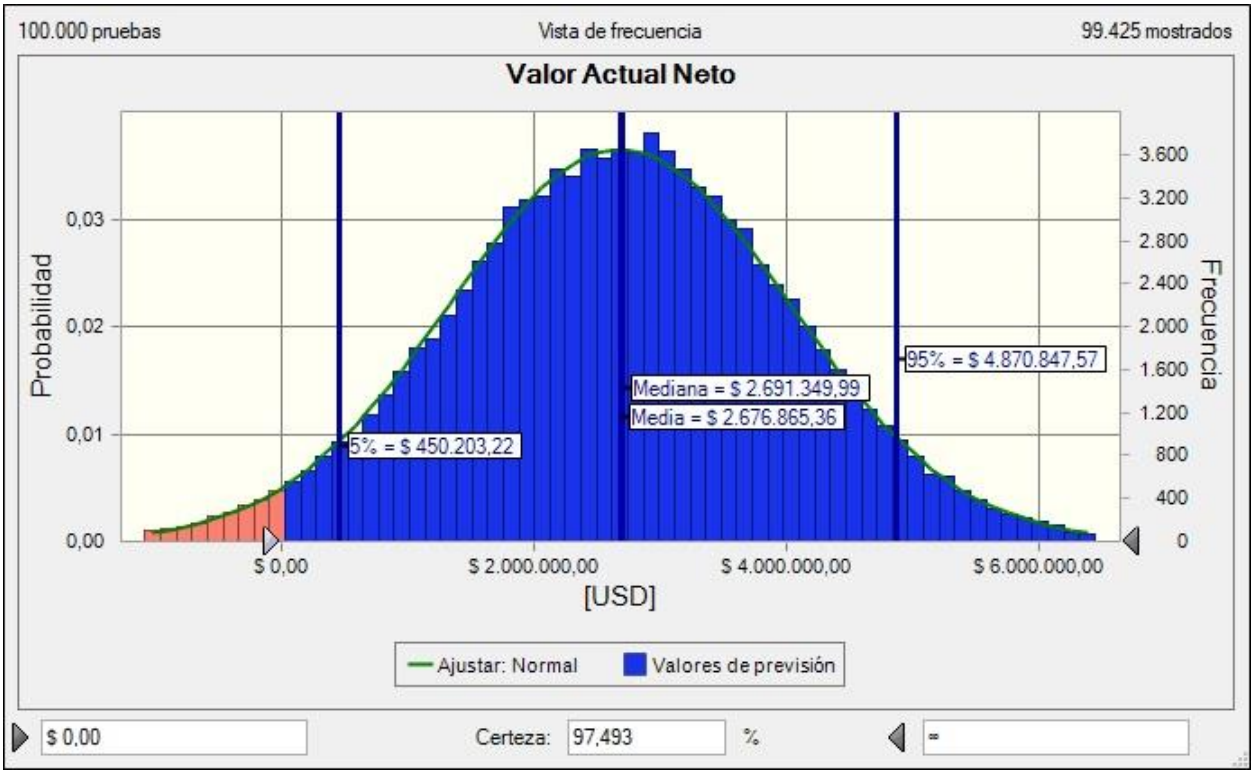


Figura 37:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60%, determinando la certeza para que este sea positivo. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

A partir del gráfico anterior, se puede observar que el *VAN* se ajusta a una distribución normal con una media de 2.676.865 $[USD]$, donde el 90% de los valores se encuentran entre 450.203 $[USD]$ y 4.870.847 $[USD]$, correspondientes al percentil 5% y 95% respectivamente. Además, es posible afirmar que la probabilidad de que el *VAN* sea positivo es del 97,5%. Esto quiere decir que, la implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas posee una probabilidad del 97,5% de generar riqueza a largo plazo, justificando económicamente su inversión.

Es importante mencionar que, al no solicitar financiamiento externo, el pronóstico de rentabilidad varía prácticamente de manera despreciable, donde se tiene una certeza del 96,9% que el *VAN* sea positivo, contando con una alta probabilidad de generar riqueza a largo plazo, independiente si se solicita o no financiamiento externo.

Siguiendo en la línea de un proyecto financiado por el 60%, se calcula la probabilidad de que el *VAN* sea mayor a 2.000.000 [USD], obteniéndose el siguiente gráfico.

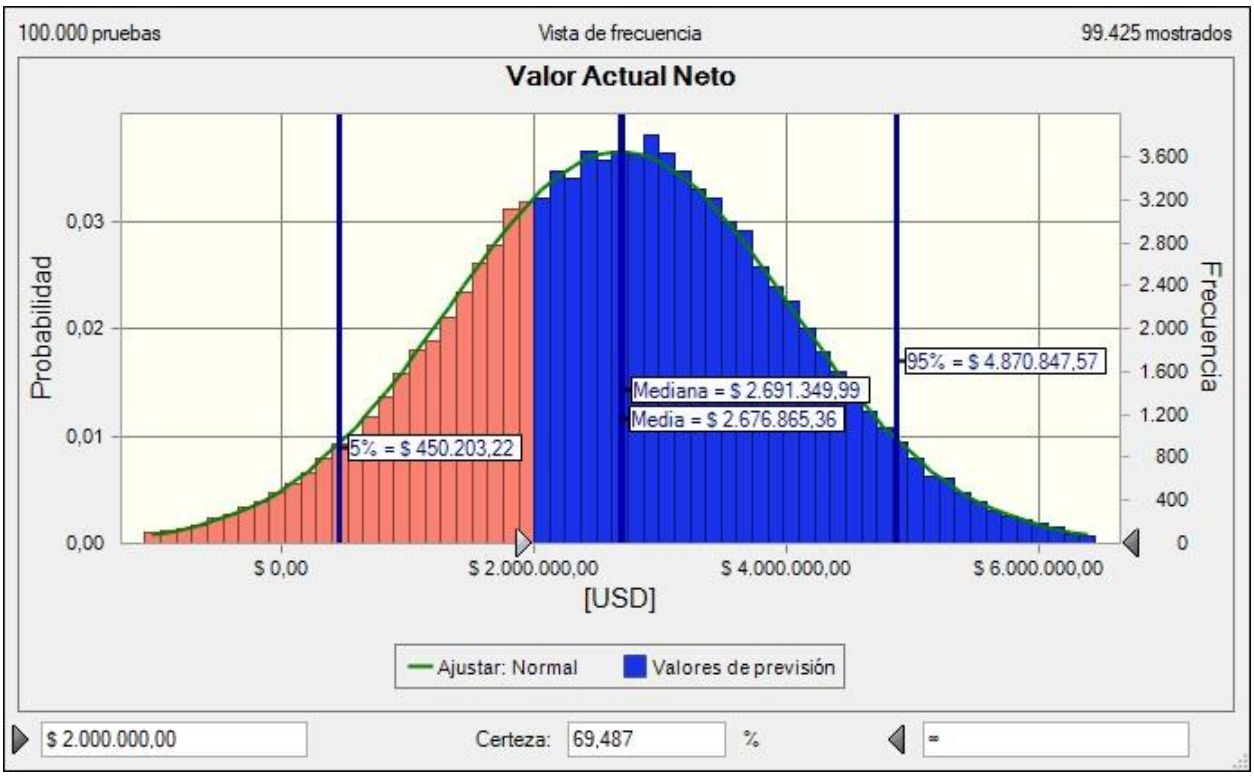


Figura 38:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60%, determinando la certeza para que este sea mayor a 2.000.000 [USD]. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

A partir del gráfico anterior, es posible afirmar que existe una certeza del 69,5% de que el *VAN* sea mayor a 2.000.000 [USD].

Por otra parte, es posible afirmar que existe una certeza del 50% que el Valor Actual Neto de la propuesta de mejora tecnológica al sistema de aguas del proceso de producción de papeles y cartones de embalaje, se encuentre entre 1.784.574 [USD] y 3.582.466 [USD], lo cual se puede observar en el siguiente gráfico.

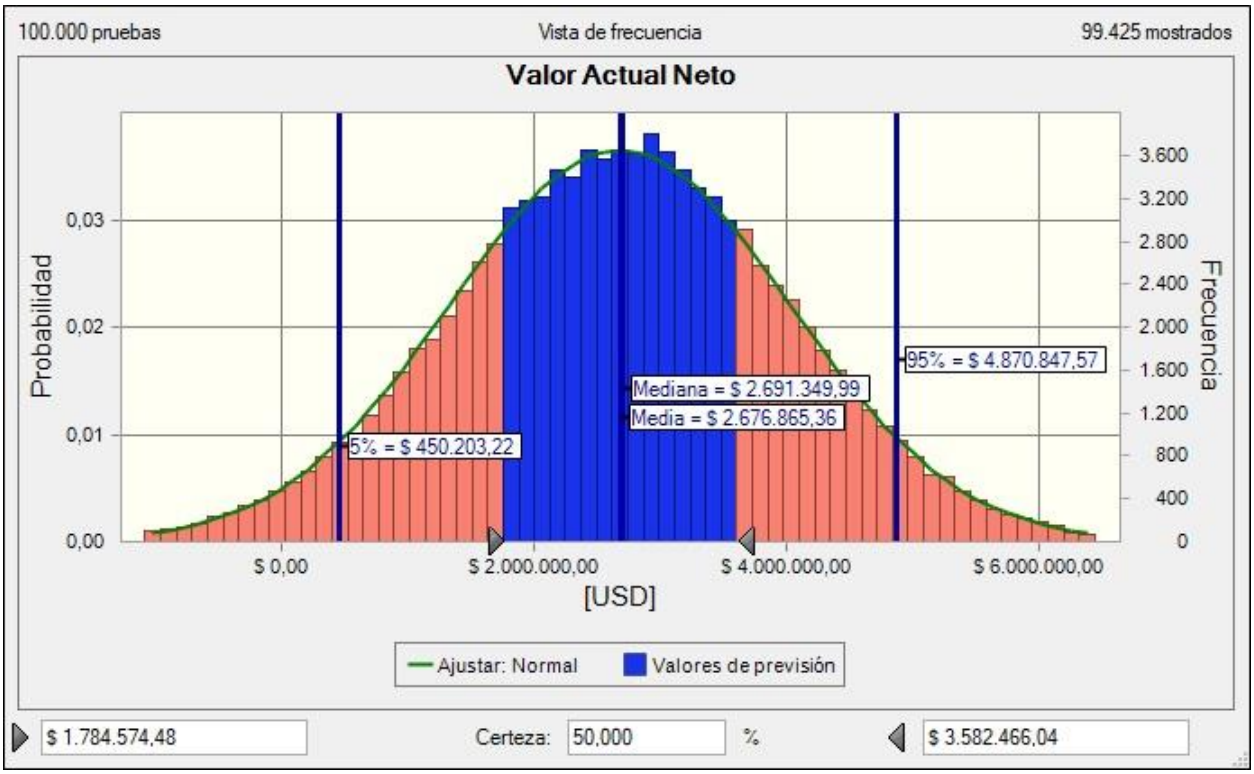


Figura 39:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60% y límites establecidos para una certeza del 50%. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

A continuación, se expone un gráfico de tendencia, centrado en la mediana, con las bandas de certeza del *VAN* para el presente proyecto, específicamente se exponen las bandas del 90%, 50%, 25% y 10% de certeza.

Figura 40: Bandas de certeza de la distribución de probabilidad del Valor Actual Neto centrado en la mediana. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

4.3.3. Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de evaluar qué variables afectan en mayor magnitud la variabilidad del *VAN*, y en consecuencia la viabilidad de la implementación de la propuesta desde un punto de vista económico, se presenta el gráfico de sensibilidad del pronóstico realizado, el cual se expone a continuación.

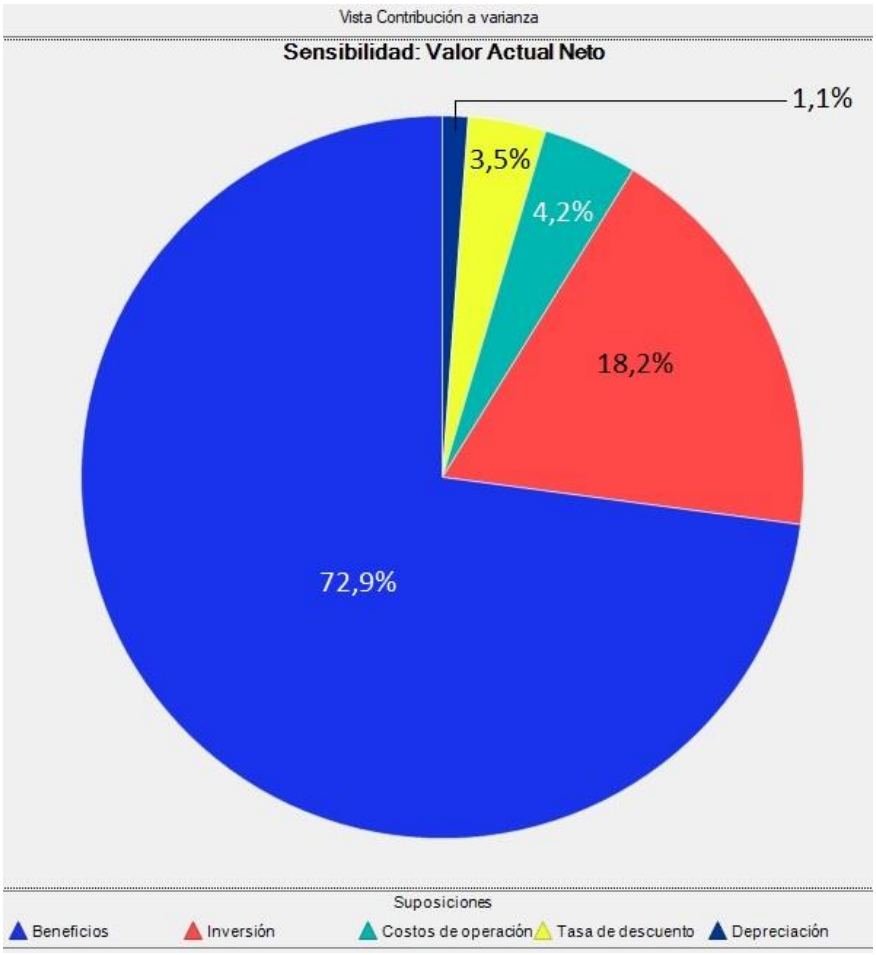


Figura 41:Gráfico de sensibilidad en base a la contribución de la varianza del VAN. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

Se observa que la variable más influyente en la variabilidad del *VAN* son los beneficios económicos esperados, con un aporte porcentual del 72,9%. En base a esto, se infiere que un conocimiento detallado en cuanto a la situación real, existente del proceso productivo y de tratamiento de aguas, es fundamental para disminuir la variabilidad del estudio. Además, se confirma la importancia a nivel económico de la confiabilidad y disponibilidad del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, ya que una falla funcional de dicho sistema repercute de

manera inmediata en los beneficios esperados del proyecto, otorgándole variabilidad a la rentabilidad del mismo.

En segundo lugar, se encuentra la inversión requerida, con un aporte porcentual del 18,2%. Dicha contribución a la varianza del *VAN*, se explica ya que esta presenta una importante variabilidad, debido a que sustituir un equipo de electroflotación de 8 celdas de electrocoagulación por uno de 2 celdas, significa prácticamente $800.000\ [USD]$ de diferencia, repercutiendo de manera inmediata a la variabilidad de la rentabilidad del proyecto.

En tercer lugar, se tienen los costos operacionales, los cuales presentan un aporte porcentual del 4,2% a la variabilidad del *VAN*. Dicha contribución, se asocia a la variabilidad entre los ciclos de tratamiento de la unidad de electroflotación, la cual tiene lugar en el circuito de regeneración de aguas del proceso de preparación de la pasta. El hecho de extender los ciclos entre tratamientos tiene una repercusión directa en el consumo energético (variable crítica de los costos operacionales) y en el consumo de floculante, disminuyendo los costos operacionales de la propuesta y, en consecuencia, afectando a la rentabilidad del proyecto.

En el cuarto lugar, se encuentra la tasa de descuento del proyecto, con un aporte porcentual del 3,5% a la variabilidad del *VAN*. El hecho de que la prima por riesgo tome valores de 1% a 5% repercute directamente en la variabilidad de la tasa de descuento y, en consecuencia, en la rentabilidad del proyecto, otorgándole una variabilidad inherente a esta, ya que el cálculo del VAN con una tasa de descuento del 6% presenta diferencias considerables al considerar una del 9%.

Finalmente, la variable menos influyente en la variabilidad del *VAN* es la depreciación de los activos fijos, con un aporte porcentual del 1,1%. Así, una desviación de ± 5 años en la vida útil de los activos se considera insignificante, en cuanto al aporte de variabilidad, para el cálculo de la rentabilidad de la propuesta de mejora tecnológica, siendo prácticamente despreciable su contribución a la varianza del *VAN*.

CAPÍTULO 5:

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones generales

El presente trabajo sugiere una propuesta de mejora tecnológica, para la implementación de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas, que facilite la operación bajo ciclo cerrado de un proceso de producción de papeles y cartones de embalaje.

Para el desarrollo del presente modelo, se tiene en consideración las necesidades con las que cuenta este tipo de proyectos, las cuales son establecidas con el apoyo del Grupo de Celulosa y Papel, del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Complutense de Madrid. En cuanto a la caracterización de efluentes, considerados como base de la propuesta, se tiene que estos son facilitados por las tesis doctoral "Tratamientos avanzados de regeneración de efluentes en la producción de papel" (Ordóñez, 2011).

Debido al alto consumo de agua fresca que presentan las industrias de celulosa y papel, se hace fundamental que estas organizaciones cuenten con una adecuada gestión del recurso hídrico dentro de sus procesos, con el objetivo de aumentar su eficiencia operacional y sustentabilidad ambiental.

Una separación efectiva de los diferentes circuitos de aguas, en base a su grado de contaminación, permite optar a tratamientos internos, los cuales ofrezcan un adecuado desempeño frente a las características físico-químicas del efluente a tratar y, satisfagan los requerimientos de calidad del proceso en particular, facilitando la operación bajo un ciclo cerrado de aguas.

El hecho de contar con pequeñas estaciones de regeneración de aguas, integradas al proceso productivo, permite un tratamiento más eficiente, ya que solo se busca satisfacer las necesidades mínimas que requiere el proceso, y con un menor grado de variabilidad, debido a que se tiene un sistema más acotado.

Así, la presente propuesta, considera la implementación de sistemas de regeneración de aguas, integrados al proceso productivo, independientes entre sí y para cada circuito de agua en particular, caracterizado por su grado de contaminación y requerimientos de calidad. Estos "riñones" del proceso, facilitan el cierre de sus circuitos de aguas, permitiendo una disminución considerable en el consumo de agua fresca y contar con un proceso "0" riles durante ciclos normales de operación.

La propuesta no considera una sustitución de la PTAS (Planta de Tratamiento de Aguas Servidas) externa a fábrica, ya que al momento de realizar los recambios de agua del sistema productivo es necesario tratar los efluentes, en base a normativa vigente, antes de ser arrojados al cuerpo receptor.

La escalabilidad de la propuesta como tal, se encuentra restringida al tipo de producto a elaborar. Esto se debe a que, tanto los requerimientos de calidad de aguas, como la caracterización de los efluentes liberados por el proceso, dependen del producto en particular a fabricar. En base esto, la propuesta tecnológica, tiene como alcance la producción de papeles y cartones de embalaje, los cuales no involucren ningún proceso de destintado ni de blanqueo, independiente del volumen de producción de la planta, ya que esto sólo afectaría el dimensionamiento de las tecnologías de tratamiento y del sistema hidráulico.

A pesar de que la propuesta, considera un proceso perteneciente a la industria papelera, se tiene que proyectos que busquen realizar una adecuada gestión del recurso hídrico y, evaluar la factibilidad reutilizarlo en la cadena de valor productiva, pueden desarrollarse de manera transversal. Esto, independiente el sector económico al que pertenezca la organización, obteniendo como consecuencia beneficios económicos, sociales y ambientales.

5.2. Conclusiones específicas

Los procesos involucrados en las industrias de celulosa y papel, se pueden caracterizar según el producto a elaborar (tipo de celulosa y tipo de papel) y la de fibra que utilizan (virgen o reciclada), existiendo grades diferencias entre los procesos involucrados.

Dentro de la producción de celulosa, se tiene la que se fabrica a partir de pasta química, donde se separa la fibra mediante la cocción de la pulpa en presencia de agentes ácidos o alcalinos (dependiendo del proceso) en un digestor. Por su parte, la que se fabrica a partir de pasta mecánica, se trituran las astillas, rompiendo las fibras. Este hecho, tiene como consecuencia, que la celulosa producida a partir de pasta química posea mejores características de resistencia y ópticas. Además, esta puede ser blanqueada o no, dependiendo de calidad óptica que se desea obtener, en base agentes químicos que oxidan la pulpa. Entre estos destacan; cloro elemental, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno y ozono, unos más contaminantes para el medio ambientes que otros.

En cuanto a la producción de papel, se tiene que este debe sus características al tipo materia prima empleada para la fabricación de este. Para papeles fabricados a partir de fibra virgen (celulosa), se tiene que el tipo de celulosa determina las características de este en cuanto a resistencia y calidad óptica. Por otro lado, los que se fabrican a partir de fibra reciclada o recuperada son sometidos a una etapa de desintegración junto a múltiples etapas de limpieza de la pasta. En algunas plantas, luego de las primeras etapas de limpieza, es común someter la pasta recuperada a procesos de dispersión y refino para mejorar las características de calidad visual y resistencia respectivamente y así, hacer más competitivos los productos fabricados a partir de fibra recuperada. Cabe mencionar que, cada vez que la fibra se somete a procesos de reciclaje, esta se va “acortando”, afectando su funcionalidad y limitando su vida útil.

Tanto la fabricación de la hoja de celulosa, como también la de los distintos papeles, tiene lugar en la “máquina de papel”. El proceso más habitual, comienza cuando luego de los procesos

de limpieza, la pasta se ingresa en un cajón que permite distribuir uniformemente esta, a lo ancho de la rejilla o tela de formación de la hoja. Una vez dispuesta en la tela de formación, la pasta comienza a deshidratarse por la acción de la gravedad y el vacío generado por las bombas de aspiración, para luego pasar por el proceso de prensado y secado, obteniéndose una pasta seca al 90-95%. Existen aditivos y procesos secundarios que le confieren a la pasta distintas características y propiedades, los cuales pueden tener lugar antes o después del proceso de deshidratación.

Independiente del producto a fabricar, se tiene que las industrias de celulosa y papel requieren grandes volúmenes de aguas, con diversas finalidades, a lo largo de su cadena de valor productiva. Estas, suelen utilizarse como; medio de dilución de la materia prima, refrigeración de equipos, limpieza, generación de vapor, entre otros. Ahora bien, el consumo específico de agua fresca por tonelada producida sí se relaciona de manera directa con el producto a fabricar. En cuanto a los residuos líquidos, generados por estas industrias, se tienen que estos se caracterizan por contener una alta carga orgánica y un alto nivel de toxicidad, de utilizar procesos de blanqueado en base a compuestos clorados.

La implementación de alternativas tecnologías o mejoras en procesos industriales, puede marcar la diferencia entre una organización que es considerada como fuente generadora de residuos líquidos industriales o no, donde el hecho de poseer procesos sustentables potencia la marca y les entrega valor agregado a sus productos comercializados. Esto ocurre cuando se generan aguas residuales con una carga contaminante media diaria superior a la de una población de 100 habitantes, en uno o más de los parámetros indicados en las tablas publicadas en cada norma de emisión. Lamentablemente, en Chile no existe beneficios directos para empresas que sean consideradas como “no generadoras de riles”, ya que, de ser así, las organizaciones contarían con una motivación adicional para desarrollar proyectos que busquen una menor repercusión ambiental.

La descarga de riles está normada en base al cuerpo receptor de agua, ya sea el sistema de alcantarillado, aguas superficiales o aguas subterráneas. Por lo general, debido al gran requerimiento del recurso hídrico, por parte de las industrias de celulosa y papel, estas se ubican cercanas a cuerpos de agua superficiales, los cuales también son utilizados como cuerpos receptores para la descarga de residuos líquidos. De esto ser así, el DS MINSEGPRES n.º 90/2000 es el que establece parámetros considerados como contaminantes y sus respectivos valores máximos permitidos. La Superintendencia de Medio Ambiente es el ente encargado de fiscalizar el cumplimento de los valores aquí establecidos, a partir del autocontrol realizado por las propias fuentes emisoras de residuos líquidos, la cual tiene sus directrices en base a la Resolución de Programa de Monitoreo (*RPM*).

Existen diversas alternativas tecnológicas para el tratamiento de los efluentes industriales, las cuales están basadas en principios físicos, químicos o biológicos. Cada tecnología, tiene su línea de acción, es decir presenta características favorables para reducir la concentración de uno o más parámetros contaminantes de interés. Por este motivo, es usual que, en las plantas de tratamiento de residuos líquidos industriales, coexistan diversos tipos de tecnologías de tratamiento, donde el sistema de tratamiento a implementar, está determinado por las características del efluente a tratar

y los requerimientos, en cuanto a calidad, que se le exige al proceso, ya sea por normativa o para la reutilización de las aguas residuales.

Por otro lado, en cuanto a la propuesta de mejora tecnológica sugerida, se tiene que esta considera la producción de papeles y cartones de embalaje, con una producción diaria de $750[ADt]$, a partir de fibra recuperada. Esta se encuentra alineada con una adecuada gestión del recurso hídrico, contando con dos grandes "mallas", separadas por unidades de deshidratación de pasta. La primera, corresponde al circuito de preparación de la pasta, la cual está compuesta por un proceso de desintegración de la materia prima y múltiples etapas de limpieza de la pasta. Mientras que la segunda, corresponde al circuito de la máquina de papel, la cual básicamente tiene la función de la formación de la hoja mediante una serie de procesos de deshidratación.

El sistema de regeneración del circuito de preparación de pasta, está compuesto por una unidad de deshidratación de rechazos, un estanque ecualizador de aguas contaminadas, un sistema de electroflotación, con ocho celdas de electrocoagulación en paralelo, y seguido por un estanque de almacenamiento de aguas regeneradas por electroflotación (*AR EDAF)*.

Por otra parte, el sistema de regeneración del circuito de la máquina de papel, está compuesto por un filtro de discos, seguido por un estanque ecualizador de aguas claras, una unidad de ultra filtración y un estanque de almacenamiento de aguas regeneradas por ultra filtración *(AR UF).*

Cabe mencionar que, el circuito de preparación de pasta contiene aguas con un grado de contaminación mayor que el circuito de la máquina de papel, debido a que es por donde ingresa la materia prima al proceso productivo y, al ser fibra recuperada, es necesario someterla a procesos de limpieza, previo que esta ingrese a la máquina papelera. En cuanto a los requerimientos de calidad de agua, se tiene que el proceso de elaboración de la hoja de papel posee mayores exigencias de calidad de aguas que el proceso de preparación de la pasta. Así, en base a estas premisas, la entrada de agua fresca al ciclo productivo se realiza por el circuito de la máquina de papel.

La implementación de la propuesta, genera una disminución del consumo específico de agua fresca por tonelada producida, alcanzando un valor de:

$$V_{agua\ fresca} \approx 1{,}03 \left[\frac{m^3}{ADt}\right]$$

En plantas actuales, que producen papeles y cartones de embalaje, el valor promedio de consumo de agua fresca es de $8{,}5 \left[\frac{m^3}{ADt}\right]$. Así considerando este valor como base, se tiene que la disminución del consumo de agua fresca por tonelada de pasta seca producida que se logra, mediante la implementación de la presente propuesta de mejora tecnología sobre el sistema de tratamiento y reutilización de aguas, alcanza el 88%.

A pesar de contar con un proceso de producción "0 riles" en condiciones normales de operación, el sistema de igual manera presenta pérdidas de aguas. Estas, se deben a la evaporación del agua, específicamente la sección de secado de la máquina de papel, el agua contenida en los lodos generados por el sistema interno de tratamiento de aguas, que a pesar de ser deshidratados poseen en su interior alrededor de un 20% de humedad, y la humedad que contiene el producto final (alrededor del 5%).

El desempeño del proceso de regeneración de aguas, es posible cuantificarlo mediante el *KPI* primario del sistema, el cual está relacionado con el consumo de agua fresca (*AF*) y determinado en base a la siguiente ecuación:

$$KPI_{AF} = \left[\frac{VCA_{AF} - VMD_{AF}}{VCA_{AF} - VN_{AF}}\right] * 100 \ [\%] \qquad (18)$$

Donde, VCA_{AF} es el Volumen en Ciclo Abierto de consumo de Agua Fresca por tonelada métrica de pasta seca producida, VMD_{AF} es el Volumen Medido Diario de consumo de Agua Fresca por tonelada métrica de pasta seca producida y VN_{AF} corresponde al Volumen Nominal de consumo de agua fresca por tonelada métrica de pasta seca producida (1,03 $\left[\frac{m^3}{ADt}\right]$).

Por otro lado, al realizar la evaluación económica de la propuesta, en base la estimación en cuanto a los costos de inversión y operacionales asociados, el cálculo de los beneficios que el sistema de regeneración produciría y ciertas suposiciones económicas que caracterizan a este tipo de proyectos, se confirma la viabilidad en términos financieros de la propuesta.

El cálculo determinístico de los indicadores de rentabilidad, en base a una tasa de descuento del 6,74% (calculada en base al método *WACC* para un financiamiento de 60%) y un horizonte de evaluación de 20 años, arroja los siguientes resultados.

Tabla 48: Cálculo determinístico de indicadores de rentabilidad con un horizonte de evaluación de 20 años y un financiamiento del 60%. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Valor
Horizonte de evaluación [años]	20
Financiamiento externo [%]	60%
Tasa de descuento [%]	6,7%
VAN [USD]	$ 2.447.931
TIR [%]	20,65%
PAYBACK [años]	4,8

En particular, el hecho de solicitar un financiamiento externo hace que la rentabilidad del proyecto aumente, debido a la disminución en el pago de impuestos y en la tasa de descuento,

utilizada para el cálculo de los indicadores de rentabilidad. En consecuencia, sí se cuenta con estructura estable de endeudamiento, lo más conveniente es solicitar financiamiento externo por parte del total de la inversión requerida. Cabe mencionar que el monto a solicitar, depende de la capacidad de endeudamiento de la organización en particular. Para el presente proyecto se establece el supuesto de que la organización puede soportar un endeudamiento por el 60% del capital requerido.

Por otro lado, cabe mencionar que, si desea evaluar que tan competitivo es el proyecto a nivel económico, se debe comparar los indicadores de rentabilidad bajo ciertos criterios. Específicamente, para comprar mediante *VAN*, es necesario hacerlo bajo la misma tasa de descuento y al mismo horizonte de tiempo, proyectando los flujos al mínimo común múltiplo entre ambos horizontes.

Para tomar una decisión en base a información más sólida, se realiza un análisis de pronósticos y sensibilidad, en base al software Crystal Ball, considerando la variabilidad de los diferentes parámetros de entrada, en base a modelos de distribución de probabilidad que se adecuan al comportamiento supuesto que presentan dichas variables. Específicamente, las variables de entrada a considerar en el análisis estocástico son; los costos de inversión y operación, los beneficios esperados, la depreciación y la tasa de descuento.

Para el cálculo del pronóstico de rentabilidad, se realiza una simulación que considera 100.000 escenarios aleatorios distintos, en base al método de muestreo de Montecarlo, con un nivel de confianza del 95%, lo que finalmente permite obtener la distribución de probabilidad del *VAN*.

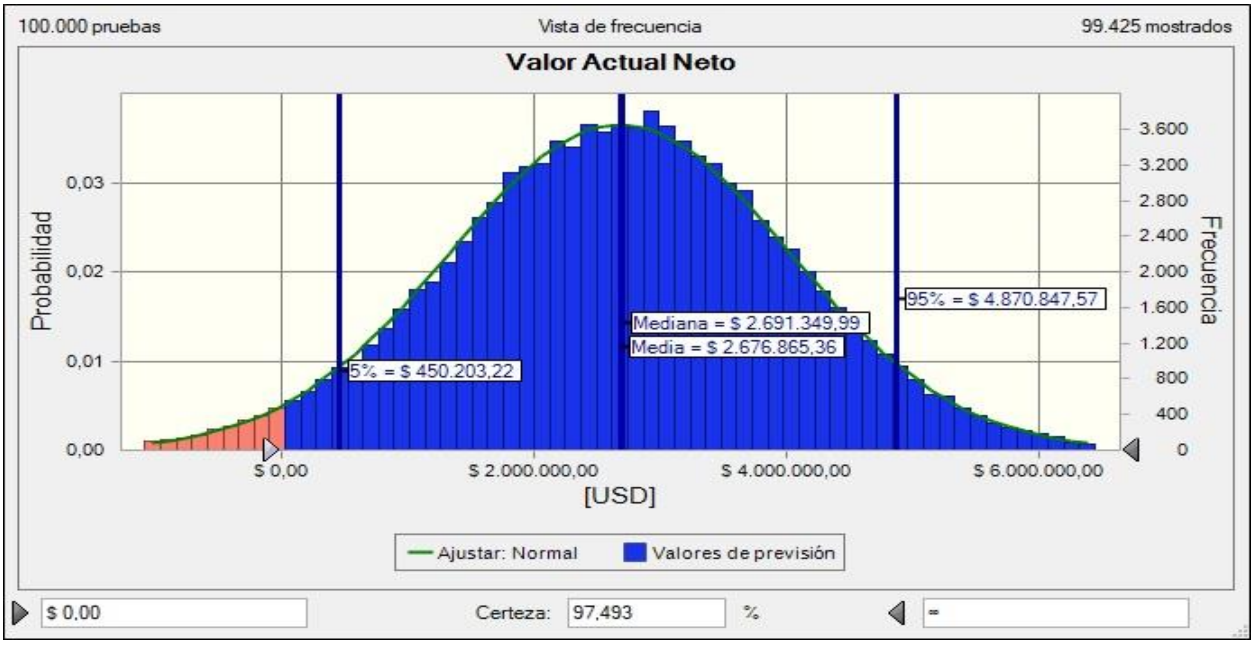


Figura 42:Distribución de probabilidad del Valor Actual Neto con un financiamiento externo del 60%, determinando la certeza para que este sea positivo. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

A partir del gráfico anterior, se puede observar que el *VAN* se ajusta a una distribución normal con una media de 2.676.865 $[USD]$, donde el 90% de los valores se encuentran entre 450.203 $[USD]$ y 4.870.847 $[USD]$, correspondientes al percentil 5% y 95% respectivamente. Además, es posible afirmar que la probabilidad de que el *VAN* sea positivo es del 97,5%. Esto quiere decir que, la implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas posee una probabilidad del 97,5% de generar riqueza a largo plazo, justificando económicamente su inversión. El hecho de que el proyecto sea financiado o no, tiene una baja repercusión en cuanto a la probabilidad de obtener riqueza de este, ya que sin financiamiento la probabilidad que el *VAN* sea positivo es del 96,9%.

Con el objetivo de evaluar qué variables afectan en mayor magnitud la variabilidad del *VAN*, y en consecuencia la viabilidad de la implementación de la propuesta desde un punto de vista económico, se presenta el gráfico de sensibilidad del pronóstico realizado, el cual se expone a continuación.

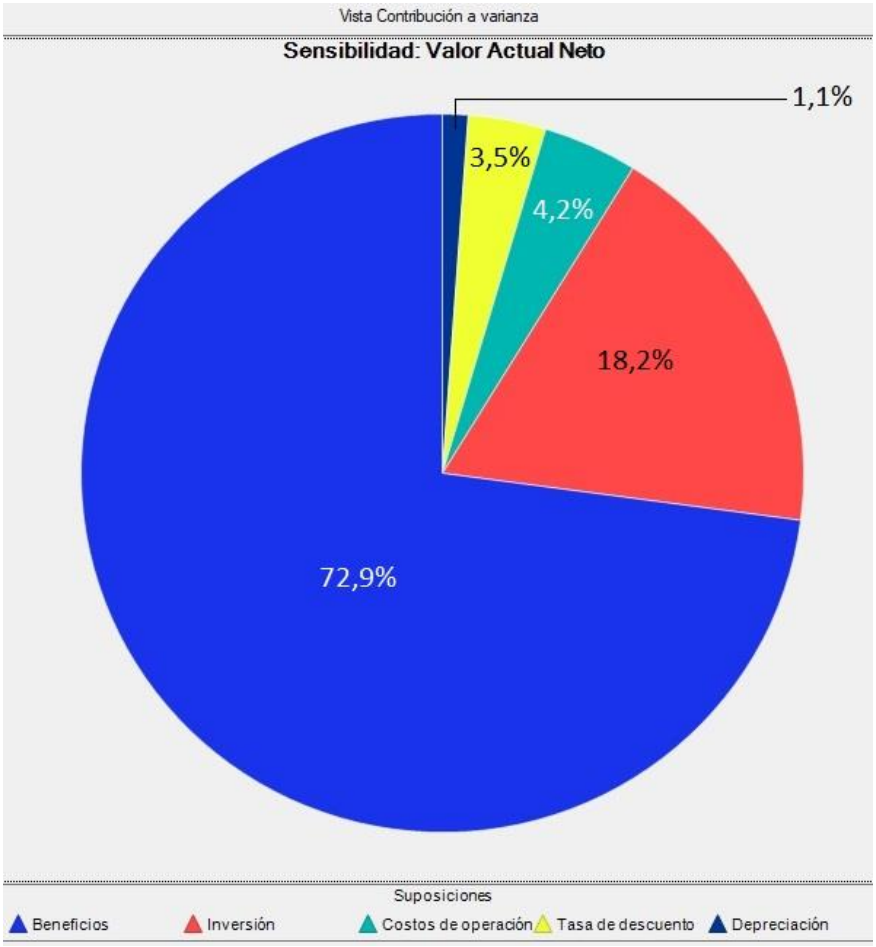


Figura 43:Gráfico de sensibilidad en base a la contribución de la varianza del VAN. Fuente: elaboración propia en base al software Crystal Ball.

Se observa que la variable más influyente en la variabilidad del *VAN* son los beneficios económicos esperados, con un aporte porcentual del 72,9%. En base a esto, se infiere que un conocimiento detallado en cuanto a la situación real, existente del proceso productivo y de tratamiento de aguas, es fundamental para disminuir la variabilidad del estudio. Además, se confirma la importancia a nivel económico de la confiabilidad y disponibilidad del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, ya que una falla funcional de dicho sistema repercute de manera inmediata en los beneficios esperados del proyecto, otorgándole variabilidad a la rentabilidad del mismo.

Las variables que le siguen son los costos de inversión y de operación respectivamente. Este hecho radica principalmente al dimensionamiento del equipo de eletroflotación, en el caso de la inversión, y en los ciclos entre operación de este, para la regeneración de aguas del circuito de preparación de la pasta, en el caso de los costos operacionales. Se observa que, tanto el aporte de la tasa de descuento, como la depreciación de los activos para la variabilidad de la rentabilidad, es prácticamente despreciable.

Finalmente, con el objetivo de visualizar los beneficios e inconvenientes, asociados a la implementación de técnicas y tecnologías de tratamiento, que faciliten la operación en ciclo cerrado en cuanto a la utilización del recurso hídrico y, contraponiéndolo con una operación bajo ciclo abierto (sin reutilización de aguas), se presenta el siguiente cuadro comparativo.

Tabla 49: Cuadro comparativo de beneficios versus inconvenientes en la implementación de ciclo cerrado en una planta papelera. Fuente: elaboración propia.

Beneficios	Inconvenientes
• Se disminuye considerablemente el consumo de agua fresca. • Es posible alcanzar una producción de “0” riles. • Sólo basta satisfacer los requerimientos de calidad mínimos del proceso. • Costos operacionales menores. • Producción alineada con el entorno y medio ambiente. • Se requiere menos adición de calor a las aguas (en caso de necesitarlo). • Se gestionan de mejor manera los recursos del sistema. • Mayor independencia de agua fresca. • Posible aumento en el volumen de ventas debido a la preferencia de los usuarios por ser un producto con “sello verde”.	• Requiere un sistema riguroso de seguimiento y control. • Posibles problemas operativos si no se respetan los requerimientos mínimos establecidos. • Requiere un protocolo y gestión de sustancias peligrosas para la limpieza *CIP* (Clean In Place). • Posible aumento en el consumo de aditivos químicos. • Sistema hidráulico más complejo. • Se requiere una inversión económica no menor.

5.3. Recomendaciones

Si se desea desarrollar un proyecto similar a la presente propuesta de mejora tecnológica se hace fundamental las siguientes consideraciones:

- ✓ Definir claramente la línea de producción a la cual se desea implementar el ciclo cerrado de aguas, ya que los requerimientos de calidad de estas dependerán en particular del producto a elaborar.
- ✓ Consultar documentación de referencia de las Mejores Técnicas Disponibles (*MTD*).
- ✓ Contactarse con los proveedores de las distintas tecnologías de interés, con el objetivo contar con información detallada de las tecnologías existentes.
- ✓ Realizar muestreos de los afluentes y efluentes del proceso productivo, con el fin de determinar los parámetros de calidad de las aguas.
- ✓ Desarrollar prototipos y realizar pruebas experimentales, esto con el objetivo de evaluar el desempeño del proceso de regeneración de aguas.

Por otra parte, si se desea implementar la presente propuesta de mejora tecnología en el sistema de aguas de una planta papelera, es fundamental contar con un sistema de muestro y análisis periódico de la calidad de las distintas aguas que se recirculan en el proceso.

Esto, permite que no exista un "sobre tratamiento" de las aguas, operando la estación de tratamiento en la medida que se necesite aumentar la calidad del agua a utilizar. Este hecho trae como consecuencia directa la disminución de los costos operacionales del sistema, fundamentales para éxito económico del proyecto.

Además, el contar con unidades de muestreo y análisis de aguas, permite prevenir posibles problemas en la calidad del producto elaborado o incluso en los mismos equipos que están involucrados en el proceso productivo.

Así, en base a un adecuado diseño del sistema de tratamiento y reutilización de aguas, junto con rigurosas estrategias de control, es posible contar con un sistema de regeneración de alto nivel y desempeño, facilitando una operación sustentable y consciente con el entorno y medio ambiente.

REFERENCIAS

Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., Ortuño, J., Meseguer, V., & Fuentes, A. (2005). Improvement of coagulation–flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid. *Chemosphere*(58), 47-56.

Agustina, T. E., Ang, H. M., & Vareek, V. (2005). A Review of Synergistic Effect of Phototocatalysis and Ozonation on Wastewater Treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology, 6*, 264-273.

Al-Ahmad, M., Abdul Aleem, F., Mutiri, A., & Ubaisy, A. (2000). Biofouling in RO membranes systems, Part 1: Fundamentals and control. *Desalination*(132), 173-179.

Almeida, E., Assaline, M. R., & Rosa, M. A. (2004). Tratamento de Efluentes Industriais por Processos Oxidativos na presença de ozônio. *Química Nova, 27*, 818-824.

Almeida, E., Assaline, M., & Rosa, M. (2004). Tratamento de Efluentes Industriais por Processos Oxidativos na presença de ozônio. *Química Nova, 27*, 818-824.

Anónimo. (2005). *Politica Ambiental Chilena.* Santiago.

Arasa, R. (2016). Los humanos lo hemos vuelto a hacer: El antropoceno, otro hito (bochornoso) de la humanidad. . Obtenido de https://allyouneedisbiology.wordpress.com/2016/10/11/antropoceno/

Area, C. M., Mastrantonio, G., & Veléz, H. (2012). Gestión ambiental en la fabricación de papel reciclado. En M. Zanuttini, *Reciclado celulósico* (Primera ed., págs. 263-303). Buenos Aires: CYTED.

Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas . (2010). *Guía para el manejo de aguas de proceso y de servicios.* Santiago.

Atehortúa, F., Bustamante, R., & Valencia, J. (2008). Modelos de gestión. En *Sistemas de gestión integral. Una sola gestión. Un solo equipo.* (Primera ed., págs. 14-36). Universidad de Antioquia. Obtenido de https://books.google.cl/books?id=15nVyh1Fn6MC&pg=PA26&lpg=PA26&dq=gesti%C3%B3n+integral+ambiental&source=bl&ots=ytB2Tryydz&sig=HT1JzdzHBoWZ3s6eFoiFB5H4i48&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjC_t7zzNLXAhVLC5AKHaoeBHoQ6AEIXzAJ#v=onepage&q&f=false

Ayala, L. (2010). *Aspectos técnicos de la gestión integrada de aguas.* Santiago.

Bajpai, P. (2000). *Treatment of Pulp and Paper Mill Effluents with Anaerobic Technology.* Surrey, UK: Pira International.

Banco Central de Chile. (2016). *Boletín Mensual.* Santiago. Obtenido de http://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/informes/BOLETIN/index_bm.html

Banco Mundial. (2011). *Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos* . Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe. .

Beltran, F., Encinar, J. M., & Gonzalez, J. F. (s.f.). Industrial Wastewater Advanced Oxidation part 2. Ozone combined with Hydrogen Peroxide or UV radiation. *Water Research, 31*, 2415-2428.

Benitez, F. J., Acero, J. L., & Real, F. J. (2002). Degradation of Carbofuran by Using Ozone, UV Radiation and Advanced Oxidation Processes. *Journal of Hazardous Materials, 89*, 51-65.

Ceballos, G., Ehrlich, P., Barnosky, A., García, A., Pringle, R., & Palmer, T. (2015). Accelerated modern human–induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, *I*(5).

Celulosa Arauco. (2014). Produción de Celulosa y Papel. Arauco, Chile.

Crespi, M. (2008). *Tratamientos con bioreactores de membrana.* Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

De Mattos, I. L., Antonelli, K., Braz, A. D., & Fernandes, J. R. (2003). Peróxido de Hidrogênio: Importância e Determinação. *Quimica Nova, 26,* 373-380.

Dulekgurgen, E., Dogruel, S., Karahan, Ö., & Orhon, D. (2006). Size distribution of wastewater COD fractions as an index for biodegradability. *Water Res*(40), 273-282.

Ferrando, M., & Granero, J. (2007). Elaboración de un Plan de Gestión de Residuos. En M. Ferrando, & J. Granero, *Gestión y Minimización de Residuos* (págs. 109-114). Madrid: FC Editorial. Obtenido de https://books.google.cl/

Fundamentos de Diseño Mecánico UTFSM. (2014). Estudio y categorización de atributos de diseño.

Fundametos de Calidad UTFSM. (2015). Competitividad y Calidad.

Gestión Ambiental UTFSM. (2015). *Derecho Ambiental.* Santiago: UTFSM.

Gestión Ambiental UTFSM. (2015). Desarrollo Sostenible. Santiago.

Gestión Ambiental UTFSM. (2015). Gestión ambiental de recursos naturales . *Recurso hídrico*. Santiago: UTFSM.

Gilpavas, E. (2008). *Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales.* Medellín: Universidad de EAFIT.

Greenpeace. (2006). *El Futuro de la Producción de Celulosa y las técnicas de producción más favorables para el medio ambiente.* Buenos Aires.

Hernández, A. (1990). *Depuración de aguas residuales* (4 ed.). (C. d. Ingenieros, Ed.) Madrid: Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid (UPM).

Hoyos, J., & Lopez, G. (2006). *Destintado enzimático de papel impreso por el método offset.* Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.

Huang, C. P., Dong, C., & Tang, Z. (1993). Advanced Chemical Oxidation: its present role and potential future in hazardous waste treatment. *Waste Management, 13*, 361-377.

Hurley, & Masterton. (1997). *Chemistry Principles and Reaction* (3 ed.). Saunders Golden Sunburst Series.

IPPC. (2006). *Documento de referncia de Mejores Técnicas Disponible en la Industria de la Pasta y Papel.* Madrid.

Judd, S., & Jefferson, B. (2005). *Membranes for industrial wastewater recovery and reuse.* Oxford: Elsevier.

Karapetrovic, S., & Willborn, W. (1998). Integration of quality and environmental management systems. *The TQM Magazine, 10*, 204 – 213.

Luraschi, M. (2007). *Análisis de la cadena productiva de celulosa y papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: Estudio del caso de Chile.* Santiago: CEPAL.

Mallevialle, J., Odendaal, P., & Wiesner, M. (1998). *Water treatment membrane process.* New York,: McGraw Hill.

Marco, A., Esplugas, S., & Saum, G. (1997). How and Why Combine Chemical and Biological Process for Wastewater Treatment. *Water Science and Technology, 35*, 321.327.

Márquez, K. (2015). *Portafolio Digital*. Obtenido de https://portafoliodigitalkretheismarquez.wordpress.com/sistemas-de-gestion-ambiental/componentes-de-un-sistema-de-gestion-ambiental/

Metcalf & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de las Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y Reutilización.* Mcgraw Hill.

Ministerio de Energía. (2017). *Balance Nacional de Energía 2015* . Santiago: Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.

Ministerio de Obras Púbicas. (2000). *Decreto Supremo N°609/98.* Santiago.

Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., J, P., & Cocke, D. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardouz Materials*, 199-210.

Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials, 84*, 29-41.

Momenti, T. (2006). *Processo Anaeróbio Conjugado com Processos Oxidativos Avançados (POA) no Tratamento dos Efluentes do Processo Industrial de Branqueamento da Polpa Celulosica.* São Paulo: Universidade de São Paulo.

Nemeth, J., & Pilutti, M. (2003). Technical and cost review of commercially available MF/UF membrane products. *IDA Conference.* Bahamas.

Nuevas normas ISO. (2015). Obtenido de Nuevas normas ISO: http://www.nueva-iso-14001.com/2015/06/iso-14001-una-gestion-ambiental-de-calidad/

Núñez, P. (2009). *Caracterización de riles de acuerdo a actividad industrial del gran Santiago* . Santiago: Universidad de Chile.

Ordóñez, R. (2011). *Tratamientos avanzados de regeneración de efluentes en la producción de papel.* Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Peña, H., Luraschi, M., & Valenzuela, S. (2004). *Agua, desarrollo y políticas públicas: la experiencia de Chile.* Santiago: GWP South America.

Perry, R. (1994). *Manual del Ingeniero Químico.* Mc Graw Hill.

Pistarelli, A. (2010). *Manual de Mantenimiento. Ingeniería, Gestión y Organización.* Buenos Aires.

Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004). Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater. *Science of the Total Environment, 333*, 37-58.

Prat, C., Vicente, M., & Esplugas, S. (1988). Treatment of Bleaching Waters in the Paper Industry by Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation. *Water Research, 22,* 663-668.

Raj, C. B., & Quen, H. L. (2005). Advanced Oxidation Process for Wastewater Treatment: Optimization of UV/H2O2 . *Chemical Engineering Science, 60*, 5305-5311.

Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables. (17 de Septiembre de 2010). *Madri+d.* Obtenido de Blog Madri+d: http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491

Rodriguez, T., Botelho, D., & Clevo, E. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(46), 24-38.

Rojas, O., & Bullon, J. (2007). *Fenómenos interfaciales en el destintado de papel desperdicio.* Mérida: Universidad de los Andes.

Rojas, R. (2002). Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales* (págs. 9-17). CEPIS/ OPS – OMS.

Ruiz-Falcó, A. (2009). Despliegue de la Función de Calidad (QFD). Madrid: Universidad Pontífica de Comillas ICAI-ICADE.

Sapag, N., & Sapag, R. (2003). *Preparación y evaluación de proyectos.* McGraw-Hil.

Savant, D. V., Abdul-Rahman, R. L., & Ranade, D. R. (2006). Anaerobic Degradation of Adsorbable Organic Halides (AOX) from Pulp and Paper Industry Wastewater. *Bioresource Technology, 97*.

Seguí Amórtegui, L. A. (2004). *Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. Metodología para el análisis técnico económico y casos.* Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Sobotka, J. (1993). The Efficency of Water Treatment and Desinfections by means of Ultraviolet Radiation. *Water Science and Technology, 27*, 343-346.

Superintendencia de Medio Ambiente. (2015). *Procedimiento técnico para la aplicación del decreto supremo MINSEGPRES N° 90/2000.* Santiago: Gobierno de Chile.

Taschke, K., Keefe, A., Astrakianakis, G., Anderson, J., Heederik, D., & Demers, P. (1998). Industria del Papel y de la Pasta de Papel. En J. M. Stellman, *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo* (4 ed., Vol. III). Ginebra, Suiza: International Labour Organization.

Teixeira, C. P. (2002). *Estudo Comparativo de Tipos Diferentes de Processos Oxidativos Avançados.* Sao Paulo: Universidad de Campinas.

Universidad Nacional de Cuyo. (2010). Celulosa y papel. Mendoza, Argentina.

UPM. (2016). Producción de Celulosa. Uruguay.

Van Haandel, A. C., & Lettinga, G. (1994). *Anaerobic Sewage Treatment. A practical Guide for Regions with a Hot Climate.* Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd.

Von Sperling, M. (2007). Activated sludge and aerobic biofilm reactors. En M. Von Sperling, *Biological Wastewater Treatment Series* (Primera ed., Vol. V). Londres: IWA Publishing.

Weinstock, I. (1993). Use of the Term "Bleaching" in the Context of Virgin and Secondary Fibers: A Clarification. En *Progress in Paper Recycling* .

White, F. (2008). *Mecánica de Fluidos.* Mc Graw Hill.

Wong, S., Teng, T., Ahmad, A., Zuhairi, A., & Najafpour, G. (2006). Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation. En J. Hazard, *Mater* (págs. 378-388).

ANEXOS

Anexo I: Procedimientos de pastas químicas

- ***Procedimiento al sulfato o Kraft***

Este, consiste en un proceso de cocción de las astillas en una solución acuosa, la cual contiene agua y licor blanco, compuesto por hidróxido de sodio ($NaOH$) y sulfuro de sodio (Na_2S). La función de la cocción consiste en liberar las fibras de celulosa contenidas en las astillas, mediante la disolución de la lignina que las mantiene unidas. Este proceso, también conocido como *Kraft*, tiene lugar en el digestor continuo a una temperatura entre los $165 - 170[°C]$, alcanzada lentamente, y a una presión de $6 - 7[bar]$, durante 3 a 4 horas. Antes de entrar al digestor, las astillas son dispuestas en una tolva, para posteriormente ser sometidas a vapor de agua con el fin de eliminar el contenido de aire de estas. Luego, entran en un vaso impregnador de alta presión, donde comienza a agregarse el licor blanco a las astillas dando origen a una mezcla que ingresa en un digestor continuo. (Celulosa Arauco, 2014).

Cabe mencionar que este proceso puede utilizar tanto maderas de fibra corta, como el eucalipto, como también maderas de fibra larga, como el pino, y presenta una remoción de lignina más eficiente que su símil mecánico, lo que permite la elaboración de productos de mayor calidad. (Luraschi, 2007).

A medida que la mezcla va descendiendo por el digestor, esta se separa en fibras de celulosa, lignina y licor de cocción. Es aquí donde una parte importante de la lignina se retira disuelta en líquido de cocción, denominado normalmente licor negro, que no es otra cosa que la mezcla entre licor blanco y lignina disuelta después del proceso de digestión. Luego, se realiza el primer lavado de la pulpa, el cual permite eliminar restos de licor negro. Este lavado ocurre en un equipo llamado difusor, en el cual la pulpa circula por el interior del equipo y entra en contacto con chorros de agua a alta presión. (Celulosa Arauco, 2014).

A continuación, se expone el diagrama de flujo de esta etapa, extraído en base a documentos bibliográficos de Celulosa Arauco.

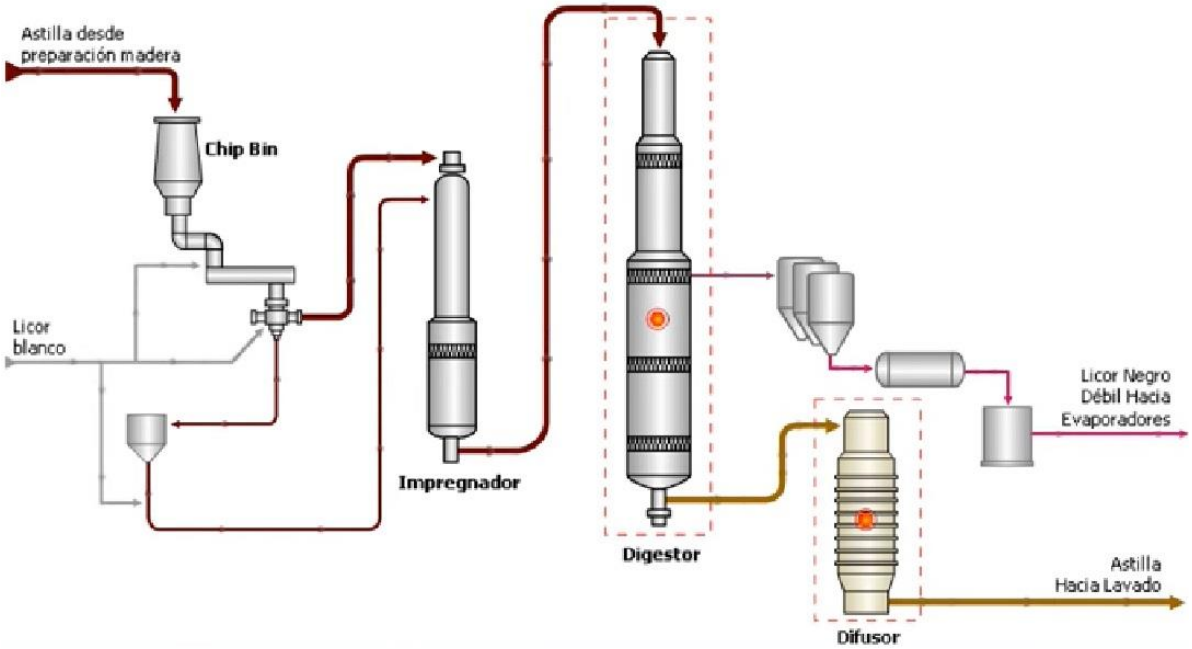


Figura 44: Diagrama de flujo de la fase de digestión. Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014.

Por otro lado, para dar comienzo al proceso de recuperación de sustancias químicas, se tiene que el licor negro extraído del digestor es sometido a un proceso de evaporación, hasta que su contenido de agua sea inferior al 40 %, y posteriormente se pulveriza en la caldera de recuperación. La parte orgánica se consume como combustible, generando calor que se recupera en la parte superior del horno en forma de vapor a elevada temperatura. La parte inorgánica no quemada se recoge en el fondo de la caldera como una mezcla fundida. El fundido fluye fuera del horno y se disuelve en una solución cáustica débil, obteniéndose un "licor verde" que contiene principalmente Na_2S disuelto y carbonato sódico (Na_2CO_3). Este licor se bombea a una planta de recaustificación, donde se clarifica y entonces reacciona con cal apagada ($Ca(OH)_2$), formando $NaOH$ y carbonato cálcico ($CaCO_3$). El licor blanco se filtra y se almacena para su posterior uso, mientras que el $CaCO_3$ se envía a un horno de cal, donde se calienta para regenerar cal viva (CaO). (Taschke, y otros, 1998).

La pasta "parda", por su color, se tamiza para separar los trozos de madera que hayan quedado sin digerir. Estos, se devuelven al digestor o a la caldera, para quemarlos y producir energía. Este proceso de clasificación ocurre en los separadores de nudos y harneros. (Taschke, y otros, 1998)

Luego, se realizan procesos de lavado en el equipo Decker, quitando restos de licor negro. Esto se realiza antes de dar paso al proceso de deslignificación, donde la pulpa se somete a un proceso de oxidación, aplicando altas dosis de oxígeno para oxidar la lignina. Este proceso, permite una menor degradación de la celulosa y reducir el consumo de reactivos en la etapa de blanqueo. (Celulosa Arauco, 2014).

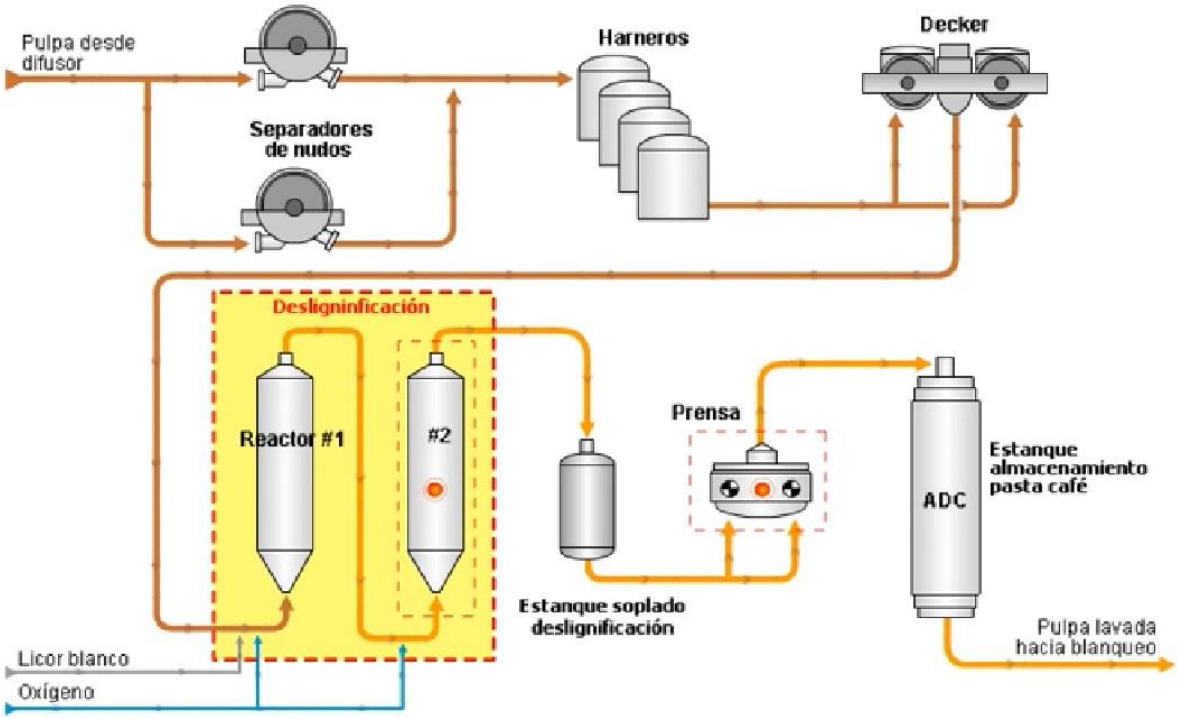


Figura 45:Diagrama de flujo de la fase de clasificación y lavado. Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014.

Posteriormente, la pulpa pasa por una prensa, permitiendo de esta manera ajustar la consistencia de la pasta al remover el agua. Finalmente, la pasta de color café es enviada a los tanques acumuladores de pasta para posteriormente pasar a la nave de blanqueado o a la de la máquina de producción de pasta, según el tipo de producto a elaborar. (Taschke, y otros, 1998).

- ***Procedimiento al sulfito***

En este caso la elaboración de la pasta de celulosa se realiza con licor de cocción de ácido sulfuroso (H_2SO_3) e ion bisulfito (HSO_3^-), los cuales se preparan en el mismo lugar. Para esto, se quema azufre elemental para producir dióxido de azufre (SO_2), que se hace pasar a través de una torre de absorción que contiene agua y una de las cuatro bases alcalinas ($CaCO_3$, el sulfito original, Na_2CO_3, hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) o hidróxido amónico (NH_4OH) que producen el ácido y el ion y controlan sus proporciones. (Taschke, y otros, 1998).

Normalmente, la pasta al sulfito se carga en digestores discontinuos revestidos de ladrillos. Para evitar reacciones no deseadas, los digestores se calientan lentamente hasta una temperatura máxima de 130 a 140 °C, y las astillas se cuecen durante un tiempo de 6 a 8 horas. Al aumentar la presión del digestor, el dióxido de azufre gaseoso (SO_2) se purga y se vuelve a mezclar con el

ácido de la cocción. Cuando quedan aproximadamente de 1 a 1,5 horas de cocción, se interrumpe la calefacción y se disminuye la presión extrayendo gas y vapor de agua. La pasta se descarga en un tanque, se lava y criba. (Taschke, y otros, 1998).

La mezcla usada en la digestión, llamada licor rojo, se puede utilizar para recuperar calor y productos químicos en todos los procedimientos, al igual que en el proceso Kraft, menos en el que tiene como base bisulfito sódico. Para la pasta al sulfito amónico, el licor rojo diluido se deja primero para eliminar el SO_2 residual, se concentra y se quema. El gas que sale contiene SO_2, se enfría y se pasa a través de una torre de absorción en la que se combina con amoniaco para regenerar el licor de cocción. Finalmente, el licor se filtra, se refuerza con SO_2 y se almacena. El amoniaco no se puede recuperar porque se transforma en nitrógeno y agua en la caldera de recuperación. (Taschke, y otros, 1998).

En la pasta al sulfito de magnesio, al quemar el licor concentrado se obtiene óxido de magnesio (MgO) y SO_2, que se recuperan fácilmente. No se produce fusión en este proceso; se recoge bastante MgO del escape de gas y se apaga con agua para producir hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$). El SO_2 se enfría y se combina con el $Mg(OH)_2$ en una torre de absorción para reconstituir el licor de cocción. El bisulfito de magnesio ($Mg(HSO_3)_2$) se refuerza con SO_2 y se almacena. Es posible una recuperación del 80 al 90 % de los reactivos de cocción. (Taschke, y otros, 1998).

La recuperación del licor de cocción de la base de sulfito sódico es más complicada. Se incinera el licor de cocción concentrado utilizado y aproximadamente el 50 % del azufre se transforma en SO_2. El resto de azufre y de sodio se recoge del fondo de la caldera de recuperación como una fusión de Na_2S y Na_2CO_3. Esta se disuelve para producir licor verde, que se transforma en bisulfito sódico ($NaHSO_3$) en varios pasos. El $NaHSO_3$ se refuerza y se almacena. El proceso de recuperación produce algunos gases sulfurados, en particular sulfuro de hidrógeno (H_2S). (Taschke, y otros, 1998).

Anexo II: Procesos y agentes de blanqueo

A continuación, se expone un diagrama de flujo de la etapa de blanqueado para la pulpa de Pino de Celulosa Arauco, la cual consta de cinco etapas hasta lograr una blancura de 90° ISO. Describiendo posteriormente los procesos involucrados. (Celulosa Arauco, 2014).

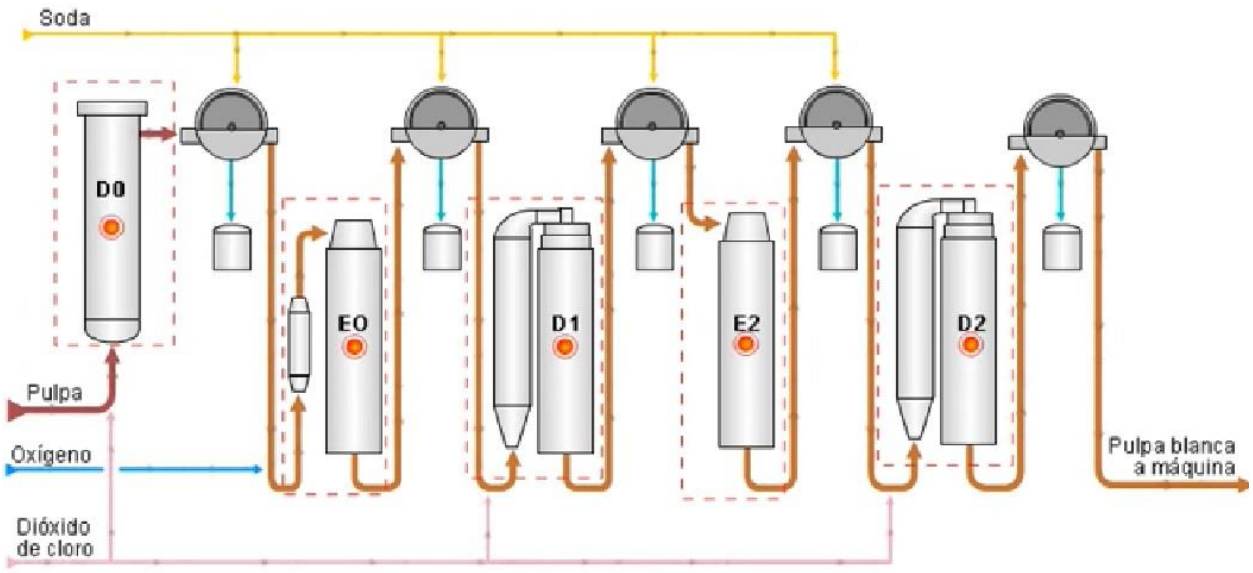


Figura 46:Diagrama de flujo de la fase de blanqueo. Fuente: Documento bibliográfico Celulosa Arauco 2014.

La primera etapa corresponde a D_0, donde su función es remover la lignina que se encuentra en la pulpa proveniente del área de lavado. Para esto, se utiliza como reactivo ClO_2 (dióxido de cloro), que oxida y degrada la lignina, haciendo la soluble, permitiendo posteriormente su extracción. Luego viene la segunda etapa, E_{op}. Aquí se realiza una extracción alcalina, en el que se utiliza como reactivo hidróxido de sodio ($NaOH$), que es reforzado con agentes oxidantes, oxígeno y peróxido. El objetivo es solubilizar la lignina oxidada en esta etapa y la anterior, para así poder removerla mediante el lavado.

La tercera etapa (D_1), consiste en aplicar nuevamente ClO_2 como reactivo, su función es remover la lignina residual mediante oxidación, para aumentar el nivel de blancura. La siguiente etapa (E_2), consiste en nuevamente realizar una extracción alcalina utilizando hidróxido de sodio. El objetivo es el mismo que la etapa E_{op}, es decir, solubilizar la lignina oxidada en esta etapa y la anterior, para así removerla mediante lavado.

Finalmente, la última etapa del proceso de blanqueo de la pulpa de pino vuelve a utilizar como reactivo ClO_2 y su función es remover la lignina residual mediante oxidación, para alcanzar la blancura final esperada, aproximadamente 90°ISO.

A continuación, se expone una tabla con diversos agentes blanqueadores y otros compuestos utilizados en el proceso de blanqueo, junto con las condiciones bajo las cuales este se desarrolla. (Taschke, y otros, 1998).

Tabla 50: Agentes involucrados en el proceso de blanqueo de pasta de celulosa. Fuente: Astrakianakis & Anderson, 1998.

	Símbolo	Concentración del agente (%)	pH	Consistencia* (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
Cloro (Cl_2)	C	2,5–8	2	3	20–60	0,5–1,5
Hidróxido sódico (NaOH)	E	1,5–4,2	11	10–12	<80	1–2
Dióxido de cloro (ClO_2)	D	≈1	0–6	10–12	60–75	2–5
Hipoclorito sódico (NaOCl)	H	1–2	9–11	10–12	30–50	0,5–3
Oxígeno (O_2)	O	1,2–1,9	7–8	25–33	90–130	0,3–1
Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)	P	0,25	10	12	35–80	4
Ozono (O_3)	Z	0,5–3,5	2–3	35–55	20–40	<0,1
Dióxido de azufre (SO_2)	A	4–6	1,8–5	1,5	30–50	0,25
Ditiosulfato sódico (NaS_2O_4)	Y	1–2	5,5–8	4–8	60–65	1–2

* Concentración de fibra en solución acuosa.

A nivel histórico la secuencia de blanqueo más comúnmente utilizada para producir pasta kraft blanqueada para el mercado se basaba en las cinco etapas del procedimiento *CEDED* (ver tabla anterior en base la definición de los símbolos). Las dos primeras etapas completan el proceso de

deslignificación y se consideran una prolongación de la obtención de pasta. (Taschke, y otros, 1998).

A causa de los condicionantes ambientales referentes a las sustancias organocloradas, las cuales presentan un alto nivel de toxicidad y se encuentran de manera importante en los vertidos de las fábricas de pasta de papel, se han adoptado alternativas que buscan disminuir el impacto de este proceso sobre el medio ambiente. Entre las alternativas se encuentran básicamente dos familias de tecnologías la *ECF (Elemental Chlorine Free)* y la *TCF (Total Chlorine Free)*. La *ECF* utiliza dióxido de cloro como agente blanqueador, mientras que la *TCF* no utiliza cloro en ninguna de sus formas, puesto que se basa en compuestos de oxígeno como agente blanqueador. (Luraschi, 2007).

En base a esto en la actualidad se sustituye parte o la totalidad del cloro elemental (Cl_2) por el dióxido de cloro (ClO_2), utilizado en la primera etapa del blanqueo, obteniéndose un proceso denominado C_DEDED o *DEDED* respectivamente. Junto con esto, se utiliza un tratamiento previo con oxígeno (O_2) durante la primera extracción cáustica, obteniéndose un proceso denominado C_DE_ODED o DE_ODED. (Taschke, y otros, 1998).

La tendencia actual de los países con mayor conciencia con el entorno y políticas ambientales más exigentes, apuntan a la sustitución completa del cloro elemental por dióxido de cloro o la eliminación de ambos compuestos. Esto, con el fin de no producir compuestos organoclorados, los cuales presentan altos niveles de toxicidad para los seres vivos. (Savant, Abdul-Rahman, & Ranade, 2006).

A nivel mundial la mayoría de los productores de pasta de celulosa blanqueada ha optado por la tecnología *ECF* y Chile no ha sido la excepción. Esto se debe a que la tecnología *ECF* presenta menores costos de inversión y más adaptabilidad a una plata ya existente. Sin embargo, para la implementación de una nueva planta los costos son similares, además, la tecnología *TCF*, debido a la ausencia de compuestos clorados, ofrece un menor grado de contaminación y tratamiento de los efluentes liberados. (Luraschi, 2007).

En el marco de las tecnologías *TCF*, se han desarrollado nuevas secuencias de blanqueo sin cloro, ejemplos de esto son las siguientes *OAZQP* y *OQPZP*, donde *Q* es un agente de quelación el que utiliza enzimas, O_2, ozono (O_3) , peróxido de hidrógeno (H_2O_2), perácidos y agentes quelantes, como el ácido etilén-diamino tetracético (AETA). Como estos nuevos métodos eliminan las fases ácidas del blanqueo, se ha de añadir un lavado ácido para permitir la remoción de los metales enlazados a la celulosa. (Taschke, y otros, 1998).

Las pastas al sulfito son generalmente más fáciles de blanquear que las pastas kraft por su menor contenido de lignina. Para muchas calidades de papel se pueden utilizar diversas secuencias de blanqueo cortas (por ejemplo, *CEH, DCEHD, P, HP*, *EPOP*). Para pastas al sulfito de calidad disolvente, utilizadas en la producción de rayón, celofán y similares, hay que eliminar la lignina y la hemicelulosa, requiriéndose secuencias de blanqueo más complejas (por ejemplo, C_1C_2ECHDA). El lavado final ácido se realiza tanto para controlar los metales como para la acción

anti-cloro. La carga de vertido para pastas al sulfito de calidad disolvente es mucho mayor porque se consume mucha madera en bruto (rendimiento típico del 50 %) y se emplea más agua. (Taschke, y otros, 1998).

En cuanto a las pastas mecánicas o de otras pastas de alto rendimiento el proceso de blanqueo suele denominarse *abrrillantado*. Esto se debe a que la operación se realiza destruyendo los grupos cromóforos sin disolver la lignina. Entre los abrillantadores están el H_2O_2 y/o el hidrosulfito sódico ($Na_2S_2O_4$). Antes del blanqueo, se añaden agentes quelantes para neutralizar cualquier ion metálico, aquí presentes para evitar la formación de sales coloreadas o la descomposición del peróxido de hidrógeno. (Taschke, y otros, 1998).

Anexo III: Aditivos de pasta y su finalidad

Tabla 51:Aditivos comúnmente empleados en la fabricación de productos papeleros. Fuente: Astrakianakis & Anderson, 1998).

Aditivo	Aplicado en	Finalidad y/o ejemplos
Talco	Extremo húmedo	Control de la mezcla extraíble* (evita la deposición y acumulación de la mezcla extraíble)
		Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco)
Dióxido de titanio	Extremo húmedo	Pigmento (hoja brillante, mejora impresión)
		Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco)
"Alumbre" $(Al_2(SO_4)_3)$	Extremo húmedo	Precipita resina al encolar sobre las fibras
		Ayuda a la retención (fija aditivos a las fibras, mejora la retención de las fibras de la pasta)
Resina	Extremo húmedo	Encolado interno (resistencia penetración líquidos)
Arcilla (caolín)	Húmedo/seco	Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco)
		Pigmento o satinado de superficie (imparte color)
Almidón	Húmedo/seco	Encolado interno (resistencia a la penetración de líquidos)
		Aditivo de resistencia por vía seca (aumenta la resistencia, reduce el polvo superficie)
		Ayuda a la retención (aditivos para encuadernación del papel, mejora la retención de la fibra de la pasta)
Tintes y pigmentos	Húmedo/seco	p. ej., tintes ácidos, básicos o directos, lacas de color, CO_3Ca, puede incluir disolventes.
Latex	Extremo seco	Adhesivo (refuerza la hoja), aditivos para encuadernación del papel, tapado de poros)
		Impermeabilización (resistencia a la penetración de líquidos)

Anexo IV: Principales procesos que le confieren propiedades y características a los papeles

- **Encolado**

Generalmente el encolado se realiza en la parte húmeda, donde se agrega almidón o agentes de encolado sintéticos al suministro de pasta para reducir la capacidad natural de absorción del papel. En el encolado, el almidón u otros agentes de encolado se aplican a la matriz de fibras para aumentar la resistencia de hoja continua de papel baja y para modificar las propiedades superficiales con respecto a la absorción de líquido durante la escritura, la impresión o el estucado. (IPPC, 2006).

También pueden aplicarse colas a la superficie de la hoja de papel (encolado superficial) para evitar que se desprenda polvo (pelusa) del papel en el proceso de impresión offset. El encolado superficial aumenta también la resistencia superficial del papel. En este proceso, la hoja continua de papel pasa a través de la balsa de solución de encolado, que está situada antes de un prensor (nip) de rodillo que presiona sobre la hoja continua (prensa de encolado). De este modo, la hoja de papel continuo absorbe la solución de encolado. La cantidad de cola absorbida depende del contenido de materia seca de hoja continua, que puede llegar al 98% antes de la prensa de encolado. (IPPC, 2006).

La tecnología de las prensas de encolado (“size press”) ha avanzado en tiempos recientes, y la prensa de encolado de película se ha convertido en la norma, siendo preferida a la tecnología más antigua que empapaba efectivamente la hoja en un prensor entre dos rodillos. Las prensas de encolado de película implican la aplicación uniforme de una cantidad controlada de mezcla de encolado con base acuosa en la hoja de papel, creando primero un espesor de película uniforme en un rodillo adyacente y transfiriendo luego la película sobre la hoja de papel como si se imprimiera la película de cola sobre el papel. El agua aplicada en la prensa de encolado se evapora en la sección posterior a la de secado. Las prensas de encolado se utilizan principalmente para papeles de impresión y escritura, así como las calidades de embalaje a base de fibra reciclada. (IPPC, 2006).

- **Estucado**

El papel, compuesto por fibras individuales, tiene una superficie relativamente áspera. Dado que esta aspereza tiene un efecto negativo sobre la impresión, una gran cantidad de papel y cartón se estuca para obtener una superficie lisa para imprimir. El término "estucado" describe la aplicación de una mezcla de agua, de pigmentos blancos, de ligante, y de diversos aditivos en una o ambas caras de la superficie del papel para crear calidades superficiales específicas. El papel puede estucarse en equipos que son parte integral de la máquina de papel (en máquina) o en equipo de estucado separado (fuera de máquina). La hoja estucada es secada por una corta sección cilíndrica calentada con vapor, por rayos infrarrojos, aire caliente o una combinación. (IPPC, 2006).

La composición de la salsa de estucado viene determinada en gran medida por los requisitos impuestos a la superficie del papel por el proceso de impresión en particular. Los estucos pueden ser mezclas complejas de ingredientes y requieren generalmente preparación antes de su uso. La preparación de la salsa de estucado se realiza en la denominada cocina de estucado, donde se mezclan y se ajustan los productos químicos de estucado. La salsa de estucado acabado es tamizada antes de entrar en la máquina de estucado. Algunas materias primas pueden recibirse húmedas para una manipulación más fácil y para evitar problemas de polvo. Todos los estucos contienen algún tipo de ligante. Puede utilizarse almidón para una mayor rigidez, pero normalmente se someterá a cocción antes de uso. Los estearatos ($Ca\ y\ NH_4$) se utilizan para proporcionar lubricación durante la aplicación, así como textura superficial. También se utilizan pigmentos, como por ejemplo arcilla fina, talco, o carbonato cálcico, así como colores, blanqueantes y otros productos químicos especiales de bajo volumen. (IPPC, 2006).

Las máquinas de estucado consisten en una desenrrolladora, una estación o estaciones de estucado (unidad de aplicación de estuco), una sección de secado (se utilizan infrarrojos, aire caliente y cilindros calentados) y una bobinadora. Para un funcionamiento óptimo, hay instalados diversos sistemas de medidas de control. Cabe distinguir diversas calidades de papel y cartón estucado. En consecuencia, los productos estarán determinados por el tipo de pasta que son elaborados y la cantidad de estuco en su superficie (gramos por metro cuadrado), entregándole propiedades para diferentes usos. (IPPC, 2006).

- ## Coloreado de papeles

Los papeles coloreados se obtienen tiñendo la pasta de papel o la superficie de papel (prensa de encolado, estucado del papel). Los papeles con blanqueantes ópticos pueden producirse de forma similar. (Taschke, y otros, 1998).

El teñido de la pasta es el tipo de coloreado de papel usado más frecuentemente. Los colorantes, pigmentos, y blanqueantes ópticos se agregan por cargas en el pulper o depósito de mezcla, o se introducen de forma continua en el flujo de pasta. La adición continua tiene la ventaja de una zona más corta en la línea de pasta, que debe limpiarse cuando se cambia el color. Sin embargo, debido al menor tiempo de contacto en comparación con la adición por cargas, se obtiene un menor rendimiento del color para los papeles intensamente coloreados y se requiere un equipo más complejo para este proceso de teñido. (IPPC, 2006).

Cuando se colorea la superficie del papel en la prensa de encolado, los colorantes se agregan a la solución de la prensa de encolado. El teñido superficial ha ganado aceptación solamente en casos particulares, ya que es difícil conseguir un teñido uniforme del papel. Sin embargo, este proceso tiene la ventaja de la ausencia de colorantes en los circuitos del agua. (IPPC, 2006).

Las superficies de los papeles pueden también colorearse por estucado. En el estucado normal, la superficie del papel o del cartón se cubre con una capa de pigmento. En el caso de estucos coloreados, el material inicial es la mezcla de estucado blanco, y el tono deseado se logra agregando una dispersión de un pigmento orgánico o inorgánico. (IPPC, 2006).

- **Adición de productos químicos**

Aparte de las materias primas principales, es decir, material fibroso y cargas (las cuales le entregan ciertas características al producto y son sustitutos baratos de la fibra), la fabricación de papel requiere el uso de diversas mezclas de aditivos y auxiliares químicos. Una parte sirve como medio para conseguir ciertas propiedades del papel (por ejemplo; aditivos de encolado, agentes de resistencia en húmedo, colorantes, salsa de estucado); la otra parte mejora las operaciones en el proceso de producción (por ejemplo; agentes de retención, agentes antiespumantes, agentes de limpieza, y biocidas). (Taschke, y otros, 1998). Los aditivos químicos pueden agregarse en la parte húmeda con la pasta de dilución, o rociarse sobre la tela, con lo cual se integran en el cuerpo del papel, o en la prensa de encolado o en la sección de estucado de la máquina, donde se agregan a la superficie. (IPPC, 2006).

En el primer caso, todo del producto químico que es retenido por la hoja de papel continuo permanecerá en el circuito de agua pasando probablemente al efluente. Los productos químicos remanentes en el circuito de agua pueden obstaculizar el proceso del cierre del circuito de agua y pueden también tener un impacto negativo en la planta de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, depende del tipo y de la cantidad de productos químicos aplicados. (IPPC, 2006).

La adición de productos químicos a la superficie, por rociado o inmersión, es potencialmente más controlada y sólo requiere el agua para lavado y limpieza. Sin embargo, esto es solamente posible para algunas aplicaciones. En esos pocos casos cualquier agua de lavado podría segregarse para su tratamiento separado. Por ejemplo, los residuos líquidos de estucado pueden tratarse por separado en un paso de precipitación o por medio de ultrafiltración. (IPPC, 2006).

- **Calandrado**

El objetivo del calandrado es producir una superficie de papel lisa que cumpla los requisitos de impresión y escritura para su uso previsto. En el calandrado, la hoja continua se alimenta a través de rodillos prensores y, en este proceso, la rugosidad superficial se ve influenciada por la acción de la presión y muy a menudo por la temperatura. (Taschke, y otros, 1998).

La hoja continua se pasa a través de la presión (nip) de estos rodillos (nips duros). Hoy en día, las calandrias tienen un rodillo calentado de fundición combinado con un rodillo con una cubierta de plástico blando (nip blando). Se disponen dos o más de éstos uno detrás del otro. Los rodillos se calientan internamente con agua caliente, vapor o aceite de calefacción. (IPPC, 2006).

En este mismo marco, otro tratamiento de acabado posterior a la máquina de papel o al proceso de estucado es el denominado supercalandrado. Este proceso produce una elevada lisura superficial, muy uniforme, y se realiza independientemente de la máquina de papel, generalmente en supercalandras, las cuales básicamente son máquinas de calandrado de múltiples etapas. Este tratamiento también mejora el brillo y aumenta la imprimibilidad, a la necesaria en caso de impresión de imágenes. Para algunas calidades, antes del supercalandrado, la hoja continua se

comprueba en rebobinadoras por si presenta defectos. Las partes defectuosas se eliminan y los extremos de la hoja se empalman otra vez. El sistema de supercalandra consiste en el soporte de devanado, la supercalandra en sí, y el soporte de bobinado. (IPPC, 2006).

Anexo V: Política Ambiental Chilena

La política ambiental, se sustenta a partir de la legislación, la institucionalidad y los instrumentos de gestión ambiental, los cuales se describen a continuación. (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

- ***Ley de Bases Generales sobre el Medio Ambiente N° 19.300:***

  Esta tiene por objetivos:

  1. Dar contenido concreto y desarrollo jurídico a la garantía constitucional que asegura a todas las personas el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación.
  2. Establecer el marco y estructura conceptual de la gestión ambiental.
  3. Establecer directrices básicas de política ambiental. Éstas deben servir de parámetro para las políticas sectoriales.
  4. Crear una institucionalidad transectorial y globalizadora, que integre y coordine las funciones y competencias ambientales sectoriales.
  5. Crear los instrumentos para una eficiente gestión del problema ambiental, de modo que su aplicación por agentes públicos y particulares permita un uso adecuado y racional de los recursos naturales.
  6. Disponer un cuerpo legal general, que sirva de referencia para el desarrollo, modernización y racionalización de la legislación ambiental sectorial.

  En cuanto a sus aportes se tienen:

  - Primera Ley que recoge en forma integrada y global los principales temas ambientales y los principios para los posteriores cuerpos legales.
  - Introduce varios instrumentos de gestión ambiental inexistentes, tales como el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), las Normas de Calidad Ambiental Primarias y Secundarias, las Normas de Emisión, la Responsabilidad Civil por Daño Ambiental, el Fondo de Protección Ambiental (FPA) y la Participación Ciudadana (PAC).
  - Reconoce a la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).

  La estructura de contenidos de la Ley 19.300 se basa en; normas generales, instrumentos de gestión ambiental, normas de responsabilidad e Institucionalidad

- ***Institucionalidad Ambiental:***

La Ley 20.417 modifica la institucionalidad ambiental chilena instaurada en la Ley 19.300, creando:

- Ministerio del Medio Ambiente – MMA
- Servicio de Evaluación Ambiental – SEA
- Superintendencia del Medio Ambiente – SMA

A partir de diciembre del 2013 entra en funcionamiento los Tribunales Ambientales. Por su parte el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas se encuentra en tramitación. Generándose el siguiente esquema.

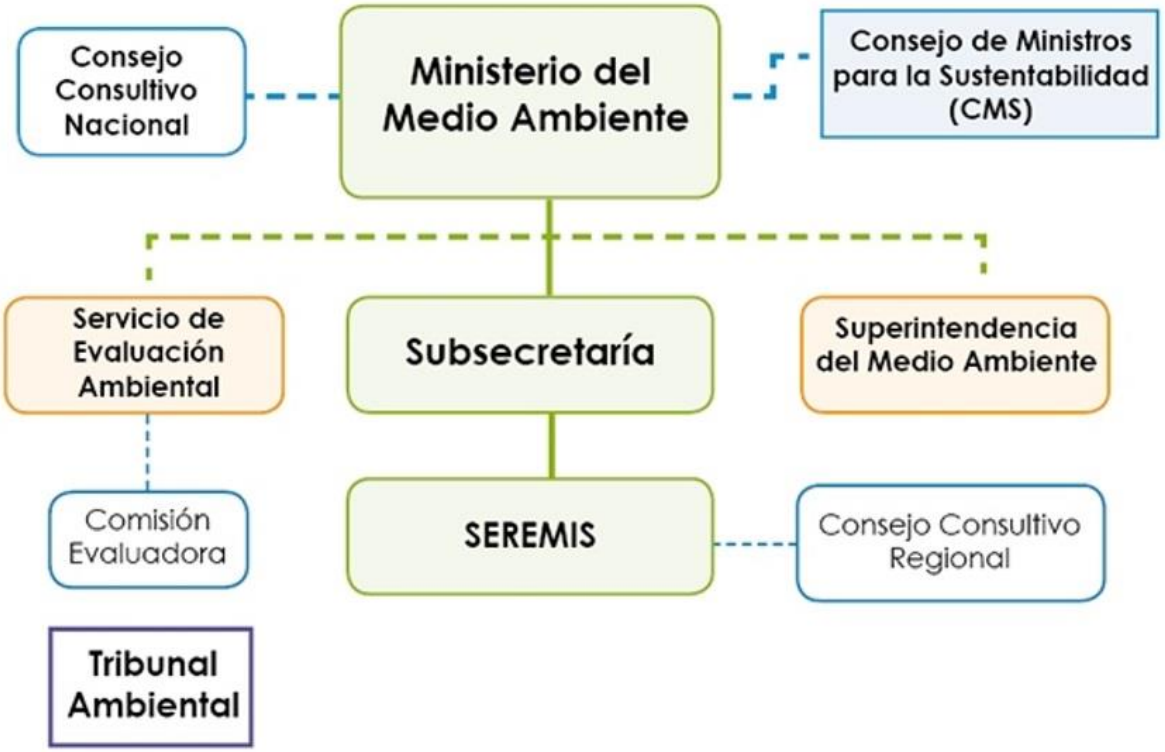


Figura 47: Esquema de Institucionalidad Ambiental Chilena. Fuente Gestión Ambiental de RRNN, 2015.

- ***Instrumentos de Gestión Ambiental del Estado:***

Dentro de los instrumentos de gestión destacan; las normativas de calidad ambiental, las normativas de emisiones y los planes de prevención y/o descontaminación, los cuales se describen a continuación:

- **Educación e investigación:** el cual consiste en un proceso educativo que debe incorporar la integración de valores y el desarrollo de hábitos y de conductas que tiendan a prevenir y resolver los problemas ambientales, a través de la transmisión de conocimientos y de la enseñanza de conceptos modernos de protección ambiental.
- **Evaluación ambiental estratégica:** La que consiste en un procedimiento realizado por ministerio respectivo para que se incorporen las consideraciones ambientales del desarrollo sustentable a formulación de políticas y planes que tengan impacto sobre el medioambiente.
- **Sistema de Evaluación de Calificación Ambiental (E.I.A):** es una herramienta práctica tendiente a prevenir efectos ambientales causados por la acción antrópica. Se persigue anticipar los futuros impactos ambientales negativos y positivos de acciones humanas permitiendo seleccionar las alternativas que, cumpliendo con los objetivos propuestos, maximicen los beneficios y disminuyan los impactos no deseados.
- **Participación de la Comunidad en él SEA:** Involucra a las organizaciones sociales, juntas de vecinos y comunidad en general a participar activamente en los procesos de evaluación ambiental de los proyectos que ingresan al SEIA.
- **Normas de calidad ambiental:** Establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población (normas de calidad primarias) o cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza (normas de calidad secundarias).
- **Normas de Emisión:** Establecen límites a la cantidad de contaminantes emitidos al aire o al agua que pueden producir las instalaciones industriales o fuentes emisoras en general. El objetivo de estas normas puede ser la prevención de la contaminación o de sus efectos, o bien ser un medio para restablecer los niveles de calidad del aire o del agua cuando estos han sido sobrepasados. Su aplicación puede ser a nivel nacional o a nivel local dependiendo del objetivo de protección que tenga la norma.
- **Planes de prevención y/o descontaminación:** Contemplan una serie de medidas de control cuya finalidad es recuperar los niveles señalados en las normas primarias y/o secundarias de calidad ambiental de una zona latente y/o saturada, respectivamente. En este sentido, su estructura depende de las fuentes que contribuyen en la calidad del medio, lo que explica su complejidad como instrumento y la singularidad de cada uno de ellos. Específicamente, los planes de prevención tienen por finalidad evitar la superación de una

> o más normas de calidad ambiental primaria o secundaria, en una zona latente. Por su parte, los planes de descontaminación tienen por finalidad recuperar los niveles señalados en las normas primarias y/o secundarias de calidad ambiental de una zona saturada.

Estos instrumentos le permiten al Estado regular e incentivar la gestión ambiental a nivel nacional. Esto, trae como consecuencia la necesidad por parte de las organizaciones, fuentes emisoras de contaminación, adoptar estrategias que se enmarquen en la sustentabilidad, que busquen cumplir con las normas ambientales vigentes e idear planes de gestión de residuos eficaces. Todo esto con el fin, que la presencia de esta, no sea un agente de desequilibrio profundo en el medio ambiente.

Anexo VI: Caracterización de riles crudos D.S. 90/2000

Tabla 52: Extracto de hoja de caracterización de riles crudos. Este contiene los parámetros considerados contaminantes y sus respectivos valores característicos de aguas servidas y carga media diaria de 100 habitantes. Fuente: SMA, 2015.

CARACTERIZACIÓN DE RILES CRUDOS
En el cumplimiento del D.S.90/00

Punto de Descarga:	<número correlativo o nombre del punto de descarga>

I.- Datos de la Descarga

Fecha Monitoreo:	<DD/MM/AAAA>	
Volumen máximo Potencial de Descarga Diario RIL (m^3/d):		<Indique Valor>
Volumen total Descarga Diario RIL monitoreado (m^3/d):		<Indique Valor>

II.- Resultados de Caracterizacion

Parámetros	Unidades	Expresión	Valor Característico en Aguas Servidas	Carga Contaminante Media Diaria en Aguas Servidas	Concentración RIL de Caracterización	Cálculo de Carga Contaminante Media Diaria (Caudal Medido)
Aceites y Grasas	mg/L	AyG	60	960		
Aluminio	mg/L	Al	1	16		
Arsénico	mg/L	As	0,05	0,8		
Boro	mg/L	B	0,75	12,8		
Cadmio	mg/L	Cd	0,01	0,16		
Cianuro	mg/L	CN^-	0,2	3,2		
Cloruros	mg/L	Cl^-	400	6.400		
Cobre	mg/L	Cu	1	16		
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	10.000.000	1,6E+12		
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr^{6+}	0,05	0,8		
Cromo Total	mg/L	Cr	0,1	1,6		
DBO5	mg O2/L	DBO_5	250	4.000		
Estaño	mg/L	Sn	0,5	8		
Fluoruro	mg/L	F^-	1,5	24		
Fósforo Total	mg/L	P	10	160		
Hidrocarburos Fijos	mg/L	HCF	10	160		
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	11	176		
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCV	1	16		
Hierro	mg/L	Fe	1	16		
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,05	0,8		
Manganeso	mg/L	Mn	0,3	4,8		
Mercurio	mg/L	Hg	0,001	0,02		
Molibdeno	mg/L	Mo	0,07	1,12		
Níquel	mg/L	Ni	0,1	1,6		
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50	800		
Nitritos más Nitratos (Lagos)	mg/L	NO_2 - NO_3	15	240		
PH (máximo obtenido)	Unidad	pH	8	8		
PH (mínimo obtenido)	Unidad	pH	6	6		
Pentaclorofenol	mg/L	C_6OHCl_5	0,009	0,144		
Plomo	mg/L	Pb	0,2	3,2		
Poder Espumógeno	mm	PE	5,0	5,0		
SAAM	mg/L	SAAM	10	160		
Selenio	mg/L	Se	0,01	0,16		
Sólidos Sedimentables	ml/1/h	SSED	6	6		
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SST	220	3.520		
Sulfatos	mg/L	$SO4^{2-}$	300	4.800		
Sulfuros	mg/L	S^{2-}	3	48		
Temperatura (máximo obtenido)	°C	T°	20	20		
Tetracloroeteno	mg/L	C_2Cl_4	0,04	0,64		
Tolueno	mg/L	$C_6H_5CH_3$	0,7	11,2		
Triclorometano	mg/L	$CHCl_3$	0,2	3,2		
Xileno	mg/L	$C_6H_4C_2H_6$	0,5	8		
Zinc	mg/L	Zn	1	16		

Anexo VII: Definición de los principales parámetros a controlar en los efluentes

Dentro de los parámetros de monitoreo destacan los siguientes, los cuales también son definidos a continuación. (Metcalf & Eddy, Inc., 1995).

- **DBO_5**: La demanda bioquímica de oxígeno, es la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable en cinco días a una temperatura de 20° C.
- **DQO**: La carga contaminante de las aguas residuales también puede expresarse mediante la *demanda química de oxígeno*, la cual representa el oxígeno requerido para la oxidación química de los constituyentes orgánicos del agua sin la intervención de organismos vivos.
- **SS o SST**: Los *sólidos suspendidos totales* se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro o fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103 – 105ºC a peso constante. Estos son fácilmente separables del líquido por procesos físicos. Se encuentran en muchos vertidos industriales en una cantidad considerable en efluentes de variados tipos de industrias, tales como fábricas de conservas y papeleras.
- **SD o SDT**: Los *sólidos sedimentables* se definen como aquellos que se depositan en el fondo del recipiente que los contiene, tras un período de tiempo específico. La determinación de los SD da una noción del volumen y densidad del lodo presente en el agua residual.
- **N**: El principal problema del nitrógeno en el ambiente es que puede ocasionar eutrofización, debido al exceso de nutrientes en los cuerpos de agua. El nitrógeno es parte de diversos componentes y comúnmente se mide como *nitrógeno total Kjeldahl* (NTK), el cual representa la suma del *nitrógeno orgánico* (proteínas y ácidos nucleicos) y *nitrógeno amoniacal* (NH_4^+). Cantidades relativamente pequeñas de NH_4^+ son tóxicas para los peces. A parte de originarse en aguas residuales domésticas e industriales, el amoníaco puede provenir de explotaciones agrícolas (fertilizantes). También se produce de forma natural por fermentaciones microbianas de productos nitrogenados tales como descomposición de proteínas o urea. El nitrógeno también se encuentra en las aguas en compuestos como nitratos (NO_3) y nitritos (NO_2), donde se tiente que el exceso de estas sustancias puede producir metahemoglobinemia, lo que reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, convirtiéndolos en sustancias potencialmente tóxicas para los seresvivos.
- **P**: El *fósforo* es un nutriente esencial para los organismos vivos. Tiene gran influencia en el proceso de eutrofización (proliferación de algas), por esa razón es importante determinar su concentración en el agua residual. En las aguas residuales aproximadamente un 50% del fósforo está presente como ortofosfato; un 10% como enlaces orgánicos y alrededor de un 40% como fosfatos condensados, provenientes de detergentes.
- **PE**: El *poder espumógeno* se define como la capacidad de una solución de producir espuma.

- **A y G**: Los *aceites y grasas* son substancias de origen vegetal o animal que consisten en mezclas de ésteres de la glicerina con los ácidos grasos, es decir, triglicéridos. Las partículas de grasa forman aglomerados que pueden taponar tuberías, además si se acumulan en aguas superficiales disminuyen el intercambio de oxígeno y pueden aumentar la demanda de oxígeno si emulsionan.
- **SO_4**: Los *sulfatos* se producen debido al uso de ácido sulfúrico y sulfato de sodio en los procesos industriales, los sulfatos también se producen durante la remoción de sulfuros por aireación debido a que la oxidación produce varias sustancias incluyendo sulfato de sodio. Los problemas se presentan con los sulfatos solubles, debido a que bajo la acción de las bacterias anaerobias los sulfatos pueden ser transformados a gas sulfhídrico que puede corroer las tuberías, si los sulfatos no son degradados aumentan la concentración de sales en los cuerpos de agua.
- **Metales pesados**: La presencia en las aguas residuales de metales pesados tales como plomo, cadmio, selenio, cromo, cobre, etc., pueden ser contraproducentes para su adecuado tratamiento, al afectar a la biomasa encargada de la estabilización de la materia orgánica. Por este motivo y su alta toxicidad para los seres vivos estos deben ser controlado en la fuente de origen.

Anexo VIII: Solicitud y seguimiento una RPM

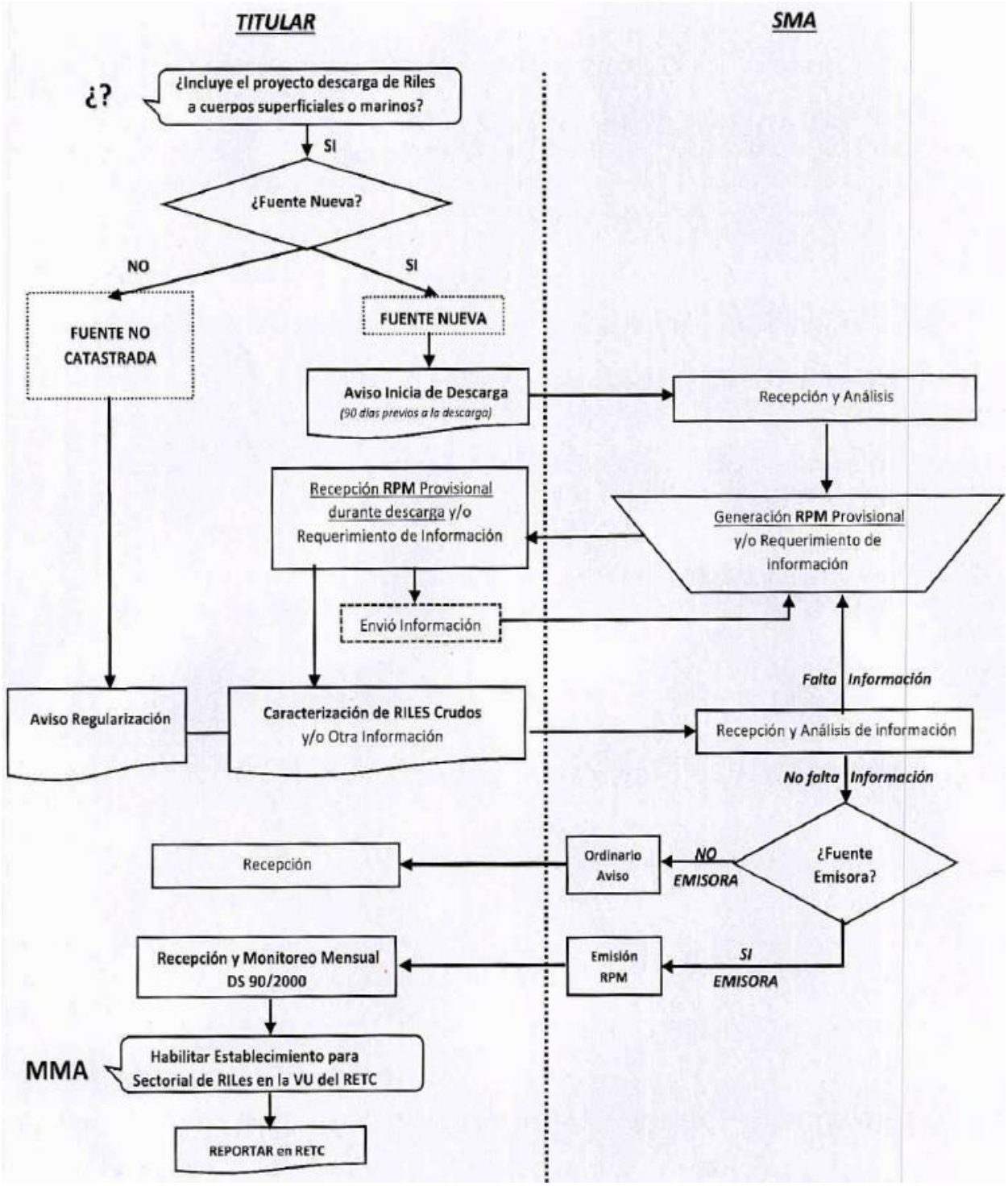


Figura 48: Diagrama de flujo de una RPM. Fuente: SMA, 2015.

Anexo IX: Tratamientos de efluentes

- ## Tratamientos de membrana

Las membranas se configuran en módulos, siendo los más importantes los de placas y marcos, los tubulares, los de arrollamiento en espiral y los de fibra hueca. En los de placas y marcos las membranas están soportadas en placas rectangulares solapadas unas con otras mediante juntas, que separan a su vez permeado y rechazo, son unidades pequeñas y la superficie de las placas está corrugada para forzar un flujo turbulento. Por su parte, las membranas tubulares se disponen dentro de tubos porosos de acero inoxidable o fibra de vidrio que hacen de carcasa, generalmente, la filtración es dentro-fuera, recogiéndose el permeado en la mencionada carcasa. En el caso de las membranas de fibra hueca están reunidas en un haz de varios miles e incluso millones de fibras. El flujo puede ser dentro-fuera, donde la hermeticidad entre flujos de alimentación y permeado se asegura por una resina que forma un plato plano en cada final de haz, también pueden ser fuera-dentro, donde las fibras se sellan y se hermetizan por un solo lado. Finalmente, en el caso de las membranas de arrollamiento en espiral, la membrana, el espaciador de la alimentación y el soporte poroso de la primera se arrollan alrededor de un canal central. Todo ello se inserta en una caja de presión y la alimentación se hace pasar en dirección axial a los canales de la superficie de la membrana y el permeado se recoge en el colector central. (Judd & Jefferson, 2005).

Las membranas están fabricadas con una amplia variedad de materiales, los cuales varían en sus propiedades químicas y mecánicas, incluyendo su presión de estallido, tolerancia a la oxidación, y a los compuestos orgánicos volátiles, intervalo de operación de pH, etc. El usuario final debe asegurarse de cuáles son las limitaciones del material seleccionado, así como de su compatibilidad con el agua de alimentación, pretratamientos requeridos y otras condiciones de operación. Los materiales más empleados son polímeros orgánicos (polipropileno o fluoruro de polivinilideno) y materiales cerámicos. Cada uno de ellos presenta sus ventajas e inconvenientes en operación y mantenimiento, datos que deben tenerse muy en cuenta a la hora de elegir cuál es el material más adecuado para cada aplicación. (Mallevialle, Odendaal, & Wiesner, 1998).

La dirección del caudal de alimentación, en relación a la superficie de la membrana, determina el modo de filtración en los sistemas de *MF* y *UF*. Los sistemas presurizados pueden operar en; modo de flujo cruzado, dividiéndose el caudal de entrada en una corriente de permeado y en una corriente rechazo, que se recircula a la entrada de la membrana, uniéndose a la alimentación; o en modo de flujo directo, donde todo el caudal de entrada atraviesa la membrana. (Ordóñez, 2011).

En el caso de operar en modo de flujo cruzado, la capa de materiales retenidos en la superficie de la membrana alcanza un determinado espesor estacionario, que es función de la velocidad a la que la fase se desplaza paralela a la superficie de la membrana. Aumentando la velocidad de la corriente, se puede reducir el espesor de dicha capa. La mayoría de los procesos de *MF* se están reconduciendo a operar de esta manera, siempre que no sea un requisito la separación completa entre rechazo y permeado. Estos sistemas llevan aplicándose a procesos industriales desde los años 70, es una configuración que consume más energía que los sistemas en modo directo, por lo que

la capacidad de tratamiento está limitada a 100 $^{m^3}/_{h}$. (Nemeth & Pilutti, 2003). Para instalaciones de mayor capacidad, la operación en flujo cruzado resulta inviable económicamente, de manera que fue a partir de los años 90 cuando se empezaron a expandir los sistemas directos. En este tipo de operación, los materiales no tienden a difundirse a lo largo de la superficie de la membrana, sino que quedan retenidos formando una torta de espesor creciente con el tiempo, la cual opone una gran resistencia al transporte a través de la membrana. (Ordóñez, 2011).

Por otra parte, la dirección con que la corriente de alimentación atraviesa la membrana, así como su orientación en relación a la superficie de la misma, define los sistemas como "dentro-fuera" y "fuera-dentro". Por ejemplo, operando con un módulo de fibra hueca y en sistema fuera-dentro, la corriente de entrada rodea a las fibras mientras el filtrado va siendo recolectado en el interior (lumen) de las fibras. El sistema fuera-dentro tienen la ventaja de ofrecer mayor superficie de membrana, pudiendo tratar más caudal, manteniendo el mismo flujo de permeado y concentración de sólidos. Un sistema dentro-fuera, en un módulo de fibra hueca, introduce la alimentación por el interior de las fibras, desde un extremo del elemento de membrana, y recoge el filtrado por el extremo opuesto, pero en el interior del elemento de membrana (exterior de las fibras). (Nemeth & Pilutti, 2003).

Los módulos más empleados para la aplicación de la *NF* y la *OI* son los arrollados en espiral, los cuales se colocan en el interior de una caja de presión que puede configurarse de múltiples formas. Para nombrar dichas configuraciones se emplean el número de pasos y el número de etapas por paso. El primero hace referencia al número de veces que la corriente de permeado de un mismo sistema se somete a filtración, es decir, cada vez que pasa por un módulo de membranas; el segundo, por el contrario, se refiere a las veces que la corriente de concentrado o rechazo es de nuevo filtrada dentro de un mismo paso. (Ordóñez, 2011).

- ## Sistemas Anaerobios

Se tiene que los digestores anaerobios se han implantado normalmente como primera etapa de tratamiento biológico cuando se requiere una eliminación elevada de materia orgánica y se quieren compensar los costos asociados al tratamiento biológico. En comparación con los reactores aerobios, generan menor volumen de lodo biológico, reduciéndose así el coste global del tratamiento. Además, la producción de biogás genera beneficios económicos, debido al ahorro en compra de combustibles empleados en la caldera. (Van Haandel & Lettinga, 1994). La eficacia de los reactores anaerobios está asociada tanto a la carga orgánica como a la calidad de la corriente de alimentación. Cargas orgánicas de entre $5\ y\ 15\ [kgDQO/m3 \cdot d]$ son las que presentan mejores rendimientos de eliminación. (Bajpai, 2000).

Si el agua a tratar contiene concentraciones elevadas de azufre inorgánico (sulfatos y/o sulfitos), como sucede en diversos efluentes de fábricas de papel, las bacterias sulfato-reductoras del lodo anaerobio pueden estimularse para alcanzar la máxima reducción de sulfatos y sulfitos. (Bajpai, 2000). El sulfuro resultante será eliminado con el biogás. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las bacterias sulfato-reductoras y las metanogénicas compiten por los mismos compuestos orgánicos, pudiendo llegar a inhibir la generación de (CH_4). Esta inhibición es

susceptible de ocurrir a bajas concentraciones de DQO en relación a la concentración de sulfato, especialmente, cuando la relación $DQO/{SO_4}^{2-}$ es inferior a 7,5. (Bajpai, 2000).

El rendimiento de un reactor anaerobio depende de la temperatura. Por lo general, operar en condiciones mesofílicas $(20 - 45[°C])$ permite una mejor estabilización del reactor (Van Haandel & Lettinga, 1994). El pH óptimo para estos sistemas se encuentra entre 6,5 y 7,5. Por debajo de 6,5 las bacterias metanogénicas disminuyen su velocidad de crecimiento, siendo este descenso más pronunciado por debajo de 6,0. Por otro lado, aunque estos microorganismos pueden desarrollarse a pH mayor de 7,5, su metabolismo se ralentiza. Normalmente el pH se mantiene en los niveles adecuados gracias a la alcalinidad del agua residual, que se aconseja esté en valores mayores de $1500\ mgCaCO3/L$ No obstante, durante la descomposición de la materia orgánica en el proceso anaerobio también se genera alcalinidad (iones ${HCO_3}^-$). (Bajpai, 2000).

Existen distintas configuraciones de reactores anaerobios, siendo los más conocidos los *UASB* ("Upflow Anaerobic Sludge Blanket") o de flujo ascendente, los *EGSB* ("Expanded Granular Sludge Blanket") y los *IC* ("Internal circulation"). (Ordóñez, 2011).

Los primeros reactores *UASB* fueron desarrollados en los años 70 y su éxito reside en un manto denso de lodo en la parte inferior del reactor. Este lodo está formado principalmente por la acumulación de sólidos en suspensión presentes en la corriente de alimentación, y por bacterias en continuo crecimiento. La turbulencia natural inducida por el biogás generado y por la corriente de alimentación, introducida por la parte inferior del reactor, proporciona un buen contacto agua residual-biomasa. La parte superior del reactor dispone de un separador trifásico para permitir la salida del biogás y separar los gránulos del efluente. (Van Haandel & Lettinga, 1994). En estudios realizados en el año 1986 se comprobó que cuando se operaba a temperaturas entre 4 y 20ºC se formaban zonas muertas en el reactor, que suponían una reducción de la eficacia. Con el objeto de conseguir una mejor turbulencia y distribución de la corriente de alimentación dentro del reactor surgió el concepto de reactores *EGSB*. (Ordóñez, 2011).

Los reactores *EGSB* se caracterizan por tener una cámara para la recuperación del biogás, una relación $altura/diámetro$ elevada, mayor a 20, y una corriente de recirculación externa del efluente a la entrada del reactor. Los dos últimos factores favorecen una mayor velocidad superficial dentro del reactor, del orden de $5\ a\ 10\ [m/h]$, mientras que en los reactores *UASB* oscila entre los $0{,}5\ y\ 1{,}5\ [m/h]$. (Van Haandel & Lettinga, 1994).

Por su parte, los reactores *IC*, son otra modificación de los reactores *UASB*. Estos recuperan el biogás en dos cámaras y también se caracterizan por una relación $altura/diámetro$ elevada. En la primera cámara, situada a media altura, el biogás recogido se emplea para generar una agitación de gas que hace circular el agua y el lodo a través del reactor. Dicha circulación sirve para mezclar el contenido del reactor y proporcionar una dilución del influente que permite aceptar grandes cargas hidráulicas y emplear menores tiempos de retención, concretamente puede multiplicar por tres y reducir a la mitad, respectivamente, ambos valores con respecto a los de los reactores *UASB*, en los que van desde $6\ a\ 15\ [m3/m2 \cdot d]$ y desde $4\ a\ 10\ [h]$, respectivamente. (Van Haandel & Lettinga, 1994).

Este tratamiento no consigue una eliminación total de $DQO\ y\ DBO_5$, por lo que el efluente obtenido no suele cumplir con los requerimientos de calidad exigidos, por este motivo no es muy común que se use como tratamiento aislado, sino que suele ir acompañado de un reactor aerobio. La explicación reside en los diferentes metabolismos de las bacterias aerobias y anaerobias. (Ordóñez, 2011). De hecho, el documento de referencia sobre las mejores tecnologías disponibles en la industria del papel y cartón establece que todos los efluentes anaerobios deben estar post-tratados por una etapa de digestión aerobia (IPPC, 2006). Combinando estos dos sistemas pueden alcanzarse reducciones de DBO_5 entre el 95 y el 99% y, dependiendo de la biodegradabilidad de la materia orgánica presente en el efluente a tratar, pueden obtenerse rendimientos de eliminación de del 90% de DQO. (Ordóñez, 2011).

- **Sistemas Aerobios**

El principio común de todos los digestores aerobios es la oxidación biológica, en presencia de oxígeno, de la materia orgánica presente en el agua residual contenida en el tanque de aireación. Existen numerosas configuraciones que van desde reactores de lodos activos a los procesos con lecho sumergido (móvil o fijo). (Gestión Ambiental UTFSM, 2015).

Los reactores de lodos activos se basan en mantener a la biomasa en suspensión. Para garantizar la estabilidad de la microbiología el pH debe mantenerse entre 6 y 9, la temperatura entre $12\ y\ 37[°C]$ y la concentración de oxígeno disuelto entre $1{,}5\ y\ 4{,}0\ [mg/L]$ (siendo $2\ [mg/L]$ el valor más comúnmente empleado). La dosificación externa de nutrientes (nitrógeno y fósforo) debe también controlarse en función de la DBO_5 del efluente a tratar, debiéndose mantener una relación DBO_5:*N*:*P* de $100:(4-6):(0{,}9-1{,}2)$, siendo la más empleada la proporción $100:5:1$ (von Sperling, 2007).

Los sólidos en suspensión totales del licor mezcla (*SSTLM*) deben mantenerse entre $3\ y\ 5\ [g/L]$, debiéndose encontrar la fracción volátil *(SSVLM*) entre el 70% y el 85% del valor anterior (Von Sperling, 2007). Otros parámetros a considerar, relacionados entre sí son: la edad del fango $(4-10\ días)$, el tiempo de retención hidráulico (TRH) $(6-8h)$, el porcentaje de recirculación de lodos desde el clarificador/decantador al reactor biológico y la velocidad de sedimentación. La carga orgánica o relación *F/M* es otro de los parámetros a tener en cuenta, variando para los reactores convencionales de lodos activos entre $0{,}3\ y\ 0{,}8\ [kgDBO5/kgSSVLM \cdot d]$. (Von Sperling, 2007).

Como evolución de los reactores convencionales de lodos activos surgieron los reactores de lecho fijo y de lecho móvil. En los reactores de lecho fijo se sumergen en el reactor soportes estructurados de plástico, tela, etc., o se hace pasar la corriente a tratar a través de un lecho granular formado por partículas de arcilla o poliestireno expandido, alcanzándose valores de *SSTLM* entre $3\ y\ 6\ [g/L]$. Sin embargo, el excesivo crecimiento de biomasa provoca en ocasiones atascamiento del lecho, requiriéndose limpiezas periódicas. (Ordóñez, 2011).

Este hecho hizo buscar alternativas que respondan mejor a esta problemática. Así, surgen los reactores de lecho móvil, basados en el crecimiento de la biopelícula sobre soportes plásticos (generalmente) que se mueven dentro del tanque de alimentación, mediante la agitación inducida por los sistemas de aireación, reportándose valores de *SST* en la biopelícula entre $3\ y\ 4\ [g/L]$. El crecimiento de la biopelícula se ve contrarrestado por la erosión que produce el movimiento de los soportes. Esto se traduce en un autolavado de los mismos y en consecuencia el desprendimiento de biomasa al medio, dando lugar a un valor de *SSTLM* que no suele superar los $3\ [g/L]$. (Von Sperling, 2007).

Por otra parte, se tienen los biorreactores de membrana (*BRM)* se basan en una variación del proceso convencional de lodos activos en el que se sumergen membranas de *MF* o *UF*, en lugar de emplear clarificadores secundarios o medios granulares filtrantes, para separar los sólidos en suspensión del licor de mezcla del efluente biológicamente tratado. La incorporación de membranas permite operar a mayores concentraciones de *SSTLM* $(8 - 15\ [g/L])$ que los lodos activos convencionales $(3 - 5[g/L]])$, pudiendo así trabajar con edades de lodo elevadas. Estas características conducen a su vez al empleo de reactores biológicos de menor volumen, al uso de tiempos de *TRH* menores y a un aumento de la capacidad de biodegradación del lodo por la presencia de microorganismos de crecimiento lento. Esta última propiedad favorece la eliminación de productos lentamente biodegradables, además los compuestos orgánicos de elevado peso molecular, que no pueden atravesar la membrana, aumentando su tiempo de residencia en el reactor y pudiendo llegar también a ser degradados. (Crespi, 2008).

Los *BRM* también presentan una serie de inconvenientes; coste relativamente alto de instalación y operación; monitorización frecuente de membranas y de mantenimiento; limitaciones a la transferencia de oxígeno ocasionada por la elevada carga orgánica del reactor; así como limitación de los intervalos de operación en cuanto a temperatura y pH para no dañar la flora microbiológica. (Crespi, 2008).

Existen dos configuraciones principales de BRM, una en las que la membrana está sumergida en el reactor biológico y otra, llamada de circulación externa, donde el reactor biológico está separado del compartimento de la membrana, de manera que el rechazo generado en este último se recircula al primero. Los reactores de membrana sumergida se caracterizan por operar a flujos de permeado menores que los de circulación externa, garantizando un flujo constante durante largos periodos de tiempo.

- Procesos de Oxidación Avanzada (POA)

✓ **Utilización de Ozono y su combinación con Radiación Ultra Violeta**

El ozono es un gas incoloro, de olor fuerte, con alto poder oxidante, es la forma triatómica del oxígeno (O_3) y en fase acuosa se descompone rápidamente a oxígeno y especies radicales. (Teixeira, 2002). El ozono ha sido estudiado varios años atrás principalmente en tratamiento de agua para abastecimiento; sin embargo, dada su

reconocida capacidad de oxidar compuestos de difíciles tratar, su utilización en diferentes efluentes industriales está siendo cada vez más citada en la literatura. (Rodriguez, Botelho, & Clevo, 2008).

Los mecanismos que influyen durante la oxidación con ozono dependen en la mayoría de los casos del pH de la solución, para condiciones ácidas la oxidación directa se presenta con ozono molecular, mientras que, para condiciones básicas, la combinación con radiación ultra violeta (UV) y/o peróxido de hidrógeno (H_2O_2), predomina la oxidación debida al radical hidroxilo OH· (mecanismo fundamental cuando el propósito de la utilización del ozono es la oxidación o la conversión de compuestos recalcitrantes). (Teixeira, 2002).

Para obtener resultados satisfactorios en el tratamiento, es necesario que el ozono se produzca continuamente en el lugar de la aplicación; sin embargo, esta recomendación representa la mayor desventaja del proceso debido a los altos costos que esto genera. (Raj & Quen, 2005). La aplicación de ozono favorece la remoción del color con eficiencias de remoción entre 95% y 97% tratando efluentes de la industria de pulpa y papel. (Pokhrel & Viraraghavan, 2004). Sin embargo, en lo que se refiere a la reducción de demanda química de oxigeno (DQO) o carbono orgánico total (COT), las eficiencias no exceden usualmente 50 a 40%, respectivamente. (Agustina, Ang, & Vareek, 2005). Por tanto, este comportamiento indica la importancia de aplicar ozono cuando el propósito es aumentar la biodegradabilidad de efluentes que contienen compuestos recalcitrantes, facilitando el tratamiento posterior con procesos biológicos, es decir, el ozono como oxidante parcial. (Rodriguez, Botelho, & Clevo, 2008).

La combinación O_3/UV, al igual que el ozono, busca en la mayoría de los casos, contribuir con el aumento de la capacidad del efluente para ser tratado por procesos biológicos. En particular, la combinación O_3/UV es de especial interés por los diferentes procesos de degradación que coexisten: fotólisis directa, ozonización directa y oxidación por radicales hidroxilo, que generan reacciones rápidas y no selectivas. (Agustina, Ang, & Vareek, 2005).

Se tiene que la combinación O_3/UV aumenta la producción del radical hidroxilo, comportamiento que puede favorecer la degradación no sólo de la materia orgánica biodegradable, sino también, de los compuestos recalcitrantes en comparación con los resultados que se obtienen cuando se aplica ozono o UV separadamente. (Agustina, Ang, & Vareek, 2005).

- ✓ **Utilización de Peróxido de hidrógeno y su combinación con Radiación Ultra Violeta**

El peróxido de hidrogeno (H_2O_2) se ha utilizado durante varios años para el tratamiento de efluentes industriales y de aguas potables, principalmente con el objetivo de remover materia orgánica. El H_2O_2 es un oxidante versátil, superior al cloro, dióxido de cloro y permanganato de potasio. Tiene la capacidad de producir radicales hidroxilo

vía catálisis, bien sea en presencia o ausencia de radiación. (De Mattos, Antonelli, Braz, & Fernandes, 2003).

Tal como se mencionó anteriormente, los radicales hidroxilos, se consideran especies con mayor "energía" para degradar compuestos recalcitrantes. La característica selectiva del peróxido de hidrógeno favorece su uso en diferentes aplicaciones. Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción y adición de catalizadores, el H_2O_2, puede oxidar compuestos orgánicos complejos en compuestos menores, menos tóxicos y más biodegradables, razones para convertir esta aplicación en una solución atractiva para tratamiento de efluentes industriales. Es importante resaltar que el exceso en la aplicación del peróxido de hidrogeno y altas concentraciones de radicales OH• origina reacciones competitivas que producen efectos inhibitorios en la degradación de los compuestos. Así, debe tenerse en cuenta la necesidad de determinar correctamente las dosis óptimas aplicadas de H_2O_2 para que no se presenten efectos negativos en la eficiencia de degradación de los contaminantes (De Mattos, Antonelli, Braz, & Fernandes, 2003).

Otro problema en la aplicación del peróxido de hidrógeno en el tratamiento de efluentes se refiere a la baja velocidad de degradación frente a algunas sustancias complejas. Por esta razón, se recomienda combinar el H_2O_2 con otros oxidantes (tratamiento híbrido con $O_3\ y/o\ UV$), de esta forma favorecer el aumento en la eficiencia de degradación de los compuestos. (Benitez, Acero, & Real, 2002).

En cuanto a la radiación UV, su espectro se puede dividir en cuatro bandas: UV-A ($315a\ 400[nm]$); UV-B ($280\ a\ 315[nm]$), UV-C ($200\ a\ 280[nm]$) y UV-vacío ($40\ a\ 200\ [nm]$). Las más utilizadas con fines ambientales son UV-A y UV-C. (Sobotka, 1993). La luz ultravioleta actúa mediante la interacción con las moléculas presentes en el medio líquido provocando en la mayoría de los casos, una ruptura de los enlaces químicos. Para que la fotólisis ocurra (disociación) es necesario la absorción de un fotón por la molécula y además que la energía del fotón exceda la energía del enlace que se quiere destruir. (Prat, Vicente, & Esplugas, 1988).

El proceso combinado H_2O_2/UV tiene la capacidad de acelerar la generación de radicales OH• que son capaces de transformar diversos compuestos orgánicos tóxicos y recalcitrantes en productos más biodegradables y menos peligrosos, proporcionando, de esta forma, mejoras en el tratamiento de los efluentes industriales. (Benitez, Acero, & Real, 2002).

El mecanismo ocurre por la acción de la radiación emitida por las lámparas UV que son capaces de fotolizar las moléculas de H_2O_2. El Fotoclivaje (rompimiento) del peróxido de hidrogeno puede en algunas situaciones, llevar a la oxidación parcial de compuestos recalcitrantes en elementos más biodegradables, mejorando la eficiencia en un posterior tratamiento biológico. El mecanismo propuesto para la fotólisis del H_2O_2 es

el rompimiento de la molécula por fotones produciendo dos radicales OH•. (Beltran, Encinar, & Gonzalez, s.f.).

Generalmente, se utilizan para la disociación del peróxido de hidrogeno lámparas UV con emisión máxima de $254\,[nm]$, debido a que la absorción del H_2O_2 alcanza su máximo a los $220[nm]$. Debe tomarse en consideración que las diferentes condiciones del medio tales como: pH, dosis de H_2O_2, características del efluente, tiempo de exposición a la radiación UV, entre otras, pueden interferir durante la aplicación del H_2O_2/UV en el tratamiento de los efluentes. (Beltran, Encinar, & Gonzalez, s.f.).

Anexo X: Balances de masa

Tabla 53: Balances de masa del sistema de aguas. Fuente: elaboración propia.

VC	Detalle	Masa sólida [t/h]	Masa agua [t/h]	Masa total [t/h]	Consistencia [-]
Malla pulper y limpieza primaria	Pulper	33,24	797,87	831,12	0,04
	Rechazos gruesos	0,66	0,81	1,48	0,45
	Pasta2	32,58	797,06	829,64	0,039
Malla deshidratación y dispeción	Pasta 2	32,58	797,06	829,64	0,039
	Pasta3	32,58	76,02	108,60	0,3
	Agua de deshidratación	-	721,04	721,04	-
Malla limpieza secundaria	Pasta 3	32,58	76,02	108,60	0,039269813
	Pasta recuperada	0,63	2,50	3,13	0,2
	Rechazos finos	1,33	1,63	2,96	0,45
	Pasta 4	31,88	3155,63	3187,50	0,01
	Agua clara a RC1	-	3078,73	3078,73	-
Malla RC2	Pasta 4	31,88	3155,63	3187,50	0,01
	Pasta 5	31,88	6343,13	6375,00	0,005
	agua blanca RC2	0,00	3187,50	3187,50	0
Malla Tela	Pasta 5	31,88	6343,13	6375,00	0,005
	Agua blanca tela	0,63	6341,25	6341,88	0,0000986
	Pasta 6	31,25	125,00	156,25	0,2
	Agua rociadores 1	-	123,13	123,13	-
Malla prensa	Pasta 6	31,25	125,00	156,25	0,2
	Agua blanca prensa	0,00	124,53	124,53	0
	Pata 7	31,25	31,25	62,50	0,5
	Agua rociadores 2	-	30,78	30,78	-
Malla secador	Pasta 7	31,25	31,25	62,50	0,5
	Agua evaporada	-	29,61	29,61	
	Pasta 8	31,25	1,64	32,89	0,95

Malla rechazos	Rechazos totales	1,99	2,44	4,43	0,45
	Lodos rechazos (secos)	1,99	0,50	2,49	0,8
	Agua a Turbia Rechazos	-	1,94	1,94	-
	Lodos totales húmedos	0,28	5,29	5,57	0,05
	Lodos totales secos	0,28	0,07	0,35	0,8
	Agua Turbia Lodos	0,00	5,29	5,29	0
Malla EDAF	Agua turbia ElectroDAF	0,00	242,76	242,76	0
	Lodos ElectroDAF	0,05	0,87	0,92	0,05
	Agua regenerada EDAF	0,00	241,88	241,88	0
Malla UF	Agua a UF	0,00	157,31	157,31	0
	Lodos UF	0,24	4,48	4,72	0,05
	Agua regenerada UF	0,00	152,82	152,82	0
Malla de lodos	Lodos ElectroDAF	0,05	0,88	0,92	0,05
	Lodos UF	0,23	4,48	4,72	0,05
	Lodo deshidratado	0,28	0,07	0,35	0,8
	Agua deshidratada	0,00	5,29	5,29	0

Tabla 54: Balance de masa foso tela y filtro de discos. Fuente elaboración propia.

VC	Detalle	M total [t/h]
Malla foso tela	Agua blanca tela	6341,88
	Agua blanca prensa	124,53
	Agua Rociadores	0,00
	Agua Blanca RC2	3187,50
	Agua blanca a filtro de discos	3278,91
Malla Filtro de discos	Agua blanca a filtro de discos	3278,91
	Pasta recuperada	3,13
	Agua clara a estanque	3275,78

Anexo XI: Cálculo del sistema de transporte de aguas

Tabla 55: Cálculo del sistema de bombeo de aguas. Fuente elaboración propia.

Unidad	ṁ[kg/s]	N°	T [°C]	Q [m^3/s]	ρ[kg/m^3]	V [m/s]	Viscosidad[Pa s]	DN [in]	d interior [m]	A [m^2]	L [m]	ε [m]	Re [-]
P1	0,539	1	45	0,00054	990	0,980	0,000596	1	0,0266	0,00056	10	0,000002	43279
P2	66,943	1	45	0,06762	990	2,095	0,000596	8	0,2027	0,03228	30	0,000002	705455
P3	133,885	1	45	0,13524	990	2,658	0,000596	10	0,2545	0,05087	50	0,000002	1123806
P4	66,688	1	45	0,06736	990	2,087	0,000596	8	0,2027	0,03228	50	0,000002	702776
P5	221,631	1	45	0,22387	990	2,564	0,000596	14	0,3334	0,08730	100	0,000002	1420134
P6	885,417	4	65	0,22587	980	2,587	0,000434	14	0,3334	0,08730	30	0,000002	1947792
P7	910,807	4	65	0,23235	980	2,661	0,000434	14	0,3334	0,08730	30	0,000002	2003647
P8	909,939	4	55	0,23095	985	2,645	0,000504	14	0,3334	0,08730	20	0,000002	1723719
P9	855,203	4	55	0,21706	985	2,486	0,000504	14	0,3334	0,08730	30	0,000002	1620031
P10	21,058	1	55	0,02138	985	2,603	0,000504	4	0,1023	0,00821	50	0,000002	520221
P11	8,550	1	35	0,00860	994	1,803	0,00072	3	0,0779	0,00477	10	0,000002	194025
P12	42,229	1	35	0,04248	994	2,279	0,00072	6	0,1541	0,01864	35	0,000002	484757
P13	40,962	1	35	0,04121	994	2,211	0,00072	6	0,1541	0,01864	30	0,000002	470214
P14	8,550	1	35	0,00860	994	1,803	0,00072	3	0,0779	0,00477	20	0,000002	194025
P15	42,752	1	35	0,04301	994	2,308	0,00072	6	0,1541	0,01864	50	0,000002	490761
P16	10,340	1	15	0,01035	999	2,170	0,001109	3	0,0779	0,00477	50	0,000002	152336

Tabla 56: Cálculo del sistema de bombeo de aguas (continuación). Fuente elaboración propia.

Unidad	Delta Z [m]	Delta V [m/s]	Delta p [Pa]	hf [m]	K[-]	hk[m]	hb[m]	ls [-]	lc[-]	f[-]	P [Pa]	P [bar]	Potencia [kW]
P1	4	0	0	0,4013	12,3	0,6015	5,003	6,7684	6,7684	0,0218	48587	0,486	0,02644724
P2	10	0	0	0,4155	12,3	2,7515	13,167	8,9262	8,9262	0,0126	127877	1,279	8,64686237
P3	10	0	0	0,8212	12,3	4,4300	15,251	9,2820	9,2820	0,0116	148118	1,481	20,0311465
P4	10	0	0	0,6877	12,3	2,7307	13,418	8,9234	8,9234	0,0126	130317	1,303	8,77842772
P5	10	0	0	1,1204	36,2	12,1327	23,253	9,4721	9,4721	0,0111	225833	2,258	50,5571172
P6	10	0	0	0,3263	12,3	4,1965	14,523	9,7002	9,7002	0,0106	139619	1,396	126,143841
P7	10	0	0	0,3438	12,3	4,4406	14,784	9,7204	9,7204	0,0106	142135	1,421	132,099369
P8	8	0	0	0,2316	12,3	4,3873	12,619	9,6127	9,6127	0,0108	121934	1,219	112,642216
P9	10	0	0	0,3097	12,3	3,8753	14,185	9,5679	9,5679	0,0109	137068	1,371	119,005901
P10	8	0	0	2,2542	12,3	4,2477	14,502	8,6550	8,6550	0,0133	140130	1,401	2,99576994
P11	5	0	0	0,3390	12,3	2,0389	7,378	7,9218	7,9218	0,0159	71943	0,719	0,61884891
P12	5	0	0	0,8071	12,3	3,2570	9,064	8,6337	8,6337	0,0134	88386	0,884	3,75494963
P13	10	0	0	0,6543	12,3	3,0645	13,719	8,6112	8,6112	0,0135	133775	1,338	5,51273556
P14	8	0	0	0,6779	12,3	2,0389	10,717	7,9218	7,9218	0,0159	104501	1,045	0,89891678
P15	10	0	0	1,1793	36,2	9,8247	21,004	8,6427	8,6427	0,0134	204812	2,048	8,80893682
P16	10	0	0	2,5688	12,3	2,9521	15,521	7,7425	7,7425	0,0167	152108	1,521	1,57440462

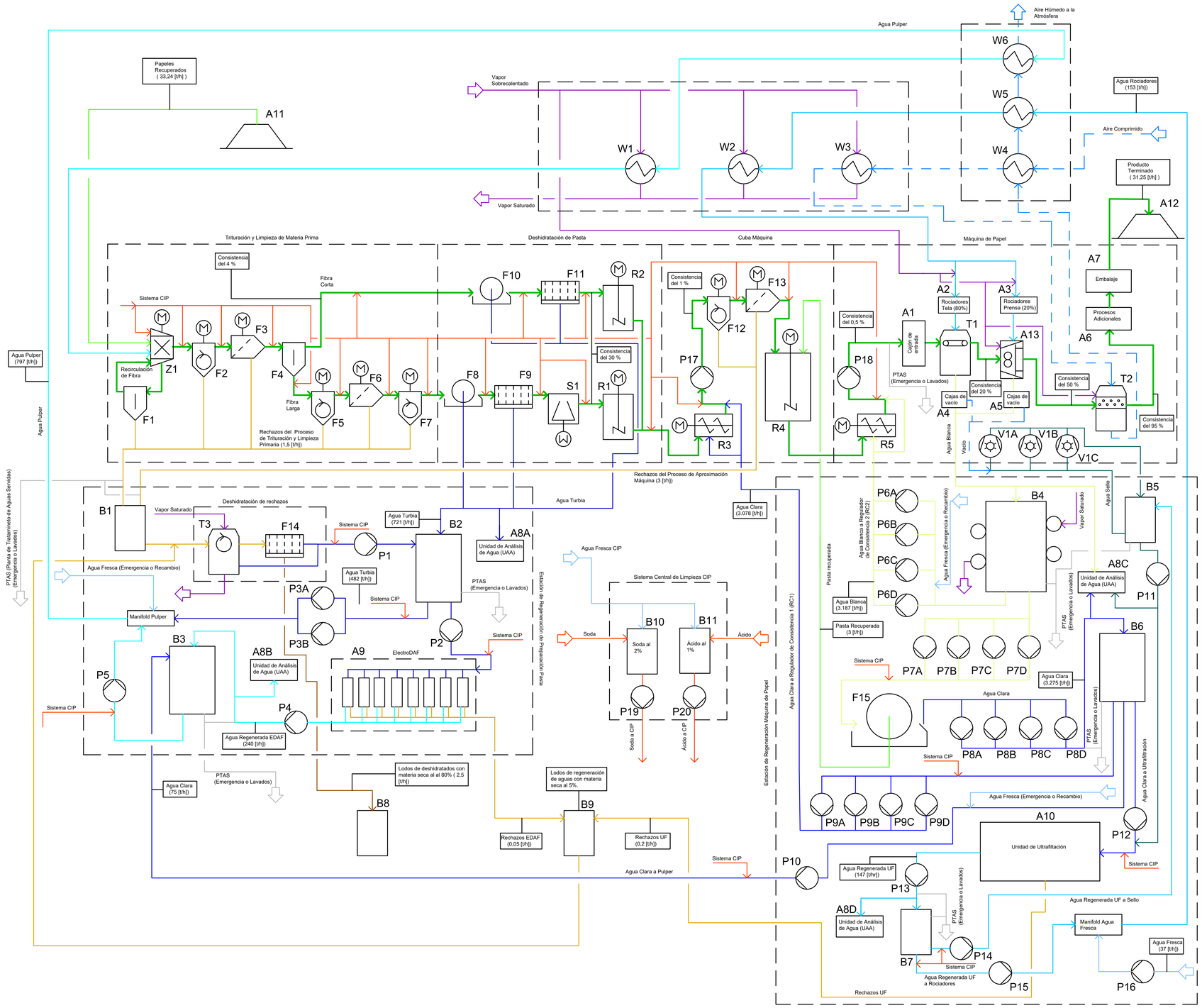
Anexo XII: Flujo de Caja

Tabla 57:Extracto del flujo de caja del proyecto. Fuente: elaboración propia

Periodo	0	1	2	3	4	5	19	20
Años	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2037	2038
Ingresos	$ -	$ 1.429.894,80	$ 1.429.894,80	$ 1.429.894,80	$ 1.429.894,80	$ 1.429.894,80	$ 1.429.894,80	$ 1.429.894,80
Egresos Totales de Producción (OPEX)	$ -	-$ 641.898,36	-$ 641.898,36	-$ 641.898,36	-$ 641.898,36	-$ 641.898,36	-$ 641.898,36	-$ 641.898,36
(Depreciacion)	$ -	-$ 136.440,00	-$ 136.440,00	-$ 136.440,00	-$ 136.440,00	-$ 136.440,00	-$ 136.440,00	-$ 136.440,00
Interes crédito		-$ 225.612,00	-$ 217.927,91	-$ 209.552,25	-$ 200.422,78	-$ 190.471,65	$ -	$ -
Resultado del ejercicio		$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
Utilidad Antes Impuesto	$ -	$ 425.944,44	$ 433.628,53	$ 442.004,20	$ 451.133,67	$ 461.084,79	$ 651.556,44	$ 651.556,44
(Impuesto a la renta [24%])	$ -	-$ 102.226,67	-$ 108.407,13	-$ 119.341,13	-$ 121.806,09	-$ 124.492,89	-$ 175.920,24	-$ 175.920,24
Utilidad Despues Impuesto	$ -	$ 323.717,78	$ 325.221,40	$ 322.663,06	$ 329.327,58	$ 336.591,90	$ 475.636,20	$ 475.636,20
Resultado del ejercicio		$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
Depreciacion	$ -	$ 136.440,00	$ 136.440,00	$ 136.440,00	$ 136.440,00	$ 136.440,00	$ 136.440,00	$ 136.440,00
Flujo de caja operacional		$ 460.157,78	$ 461.661,40	$ 459.103,06	$ 465.767,58	$ 473.031,90	$ 612.076,20	$ 612.076,20
(Capital de Trabajo)	-$ 52.758,77							
(Inversion) (CAPEX)	-$ 4.178.000,00							
Recuperación Capital de trabajo								$ 52.758,77
Préstamo	$ 2.506.800,00							
Amortizacion		-$ 85.378,81	-$ 93.062,90	-$ 101.438,56	-$ 110.568,03	-$ 120.519,15	$ -	$ -
Valor Residual de Activos								$ 784.000,00
Flujo Neto	-$ 1.723.958,77	$ 374.778,97	$ 368.598,50	$ 357.664,50	$ 355.199,54	$ 352.512,74	$ 612.076,20	$ 664.834,97
Flujo Neto Acumulado	-$ 1.723.958,77	-$ 1.349.179,80	-$ 980.581,30	-$ 622.916,80	-$ 267.717,25	$ 84.795,49	$ 5.844.754,64	$ 6.509.589,61

Anexo XIII: Plano de la propuesta de mejora

A continuación, se expone el plano que contiene la propuesta de mejora a nivel de equipos y componentes. Este, se encuentra normado en base a la norma ISO 10.628 (para la identificación de los distintos equipos y componentes de forma universal) y la NCh 14 (para el cuadro de rotulación).



V1 (A, B, C)	BOMBA DE VACÍO	15 [m^3/h]
P20	BOMBA	80 [m^3/h]
P19	BOMBA	80 [m^3/h]
P18	BOMBA MEZCLADORA	6.400 [t/h]
P17	BOMBA MEZCLADORA	3.200 [t/h]
P16	BOMBA	60 [m^3/h]
P15	BOMBA	160 [m^3/h]
P14	BOMBA	35 [m^3/h]
P13	BOMBA	160 [m^3/h]
P12	BOMBA	160 [m^3/h]
P11	BOMBA	35 [m^3/h]
P10	BOMBA	80 [m^3/h]
P9 (A,B,C,D)	BOMBA	850 [m^3/h]
P8 (A,B,C,D)	BOMBA	850 [m^3/h]
P7 (A,B,C,D)	BOMBA	850 [m^3/h]
P6 (A,B,C,D)	BOMBA	850 [m^3/h]
P5	BOMBA	850 [m^3/h]
P4	BOMBA	250 [m^3/h]
P3 (A,B)	BOMBA	500 [m^3/h]
P2	BOMBA	250 [m^3/h]
P1	BOMBA	2 [m^3/h]
B11	ESTANQUE DE ÁCIDO (1%)	40 [m^3]
B10	ESTANQUE DE SODA (2%)	40 [m^3]
B9	ALMACENAMIENTO LODOS HÚMEDOS	40 [m^3]
B8	ALMACENAMIENTO LODOS SECOS	40 [m^3]
B7	ESTANQUE AGUA REGENERADA UF	400 [m^3]
B6	ESTANQUE AGUA CLARA	6.000 [m^3]
B5	ESTANQUE AGUA SELLO	40 [m^3]
B4	FOSO AGUA BLANCA	6.000 [m^3]
B3	ESTANQUE AGUA REGENERADA EDAF	700 [m^3]
B2	DEPOSITO AGUA TURBIA	1.500 [m^3]
B1	ESTANQUE DE RECHAZOS DE PROCESO	40 [m^3]
W6	INTERCAMBIADOR DE CALOR	AGUA - AIRE (797 [t/h])
W5	INTERCAMBIADOR DE CALOR	AGUA - AIRE (153 [t/h])
W4	INTERCAMBIADOR DE CALOR	AIRE - AIRE
W3	INTERCAMBIADOR DE CALOR	AIRE - VAPOR
W2	INTERCAMBIADOR DE CALOR	AGUA - VAPOR (153 [t/h])
W1	INTERCAMBIADOR DE CALOR	AGUA - VAPOR (797 [t/h])
T3	SECADOR DE TAMBOR ROTATIVO	5 [t/h]
T2	SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO	32 [t/h]
T1	SECADOR DE TELA	32 [t/h]
R5	ESTANQUE MEZCLADOR (RC2)	4.000 [t/h]
R4	CUBA MÁQUINA DE PASTA	3.500 [t/h]
R3	ESTANQUE MEZCLADOR (RC1)	1.000 [t/h]
R2	TINA DE PASTA DE ALTA CONSISTENCIA	120 [t/h]
R1	TINA DE PASTA DE ALTA CONSISTENCIA	120 [t/h]
S1	REFINADOR	120 [t/h]
F15	FILTRO DE DISCO	3.280 [t/h]
F14	FILTRO DE PRENSA	5 [t/h]
F13	DEPURADOR FINO	3.100 [t/h]
F12	DEPURADOR CICLÓNICO (HW)	3.100 [t/h]
F11	FILTRO DE PRENSA	850 [t/h]
F10	FILTRO DE DISCO	850 [t/h]
F9	FILTRO DE PRENSA	850 [t/h]
F8	FILTRO DE DISCO	850 [t/h]
F7	DEPURADOR CICLÓNICO (LW)	850 [t/h]
F6	DEPURADOR ESPESO	850 [t/h]
F5	DEPURADOR CICLÓNICO (HW)	850 [t/h]
F4	FRACCIONADOR DE FIBRA	850 [t/h]
F3	DEPURADOR ESPESO	850 [t/h]
F2	HIDROCICLÓN	850 [t/h]
F1	SEPARADOR DE RECHAZOS PULPER	
Z1	PULPER	850 [t/h]
N° IDENTIFICACIÓN	EQUIPO	DETALLE / CAPACIDAD

A13	PRENSA DE RODILLOS	31,25 [t/h]
A12	ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS	31,25 [t/h]
A11	ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA	33,24 [t/h]
A10	UNIDAD DE ULTRAFILTRACIÓN	160 [m^3/h]
A9	CELDAS DE ELECTROFLOTACIÓN	250 [m^3/h]
A8 (A,B,C,D)	UNIDAD DE ANÁLISIS DE AGUA	
A7	EMBOBINADO, CORTE Y EMBALAJE	31,25 [t/h]
A6	PROCESOS ADICIONALES DE DETALLE	31,25 [t/h]
A5	CAJAS DE VACÍO PRENSA	
A4	CAJAS DE VACÍO TELA	
A3	ROCIADORES PRENSA	850 [t/h]
A2	ROCIADORES TELA	850 [t/h]
A1	CAJÓN DE ENTRADA MÁQUINA	6.400 [t/h]
N° IDENTIFICACIÓN	EQUIPO	DETALLE / CAPACIDAD

	DIBUJO	REVISO	FORMATO	UNIDAD DIMENSIONAL	ESCALA	
FECHA	26.06.18		A0	mm	S.E.	
NOMBRE	S. L. N					

SISTEMA DE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS INTEGRADO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPELES Y CARTONES DE EMBALAJES CON CAPACIDAD DE 750 [T/DÍA]

SEBASTIÁN LORENZI NEWMAN

N° 1