

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de línea de reciclaje de papel para elaboración de cartón
prensado en una institución universitaria

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Ana Belén Coloma Guzmán

Diego Paúl Palacio Peñafiel

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres por siempre inculcarme interés hacia el conocimiento, apoyarme en cada decisión que he tomado y nunca permitir que me rinda. A mi tía y mi hermano que día a día me impulsaron para seguir adelante. A mis abuelos, personas maravillosas que siempre con amor y anécdotas insistieron en mi superación profesional. A mi enamorado por su apoyo incondicional durante la carrera, siempre diciendo que lo lograría.

Ana Coloma Guzmán

Dedico este proyecto a mi padre que siempre me enseñó el valor del trabajo y el fruto del esfuerzo. A mi madre quien siempre confió en mí y me apoyó de manera incondicional en mi trayecto universitario. A mi hermano y hermana que siempre me ayudaron cuando más lo necesitaba. A mi enamorada que siempre fue un pilar para poder lograr las metas propuestas durante la carrera. A mi abuelita que siempre fue uno de los motivos por el cual superarme día tras día.

Diego Palacio Peñafiel

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por ayudarme en todo momento, a mis compañeros y amigos que fui conociendo durante la carrera, gracias por todas las experiencias que compartimos y el apoyo incondicional, sin duda llenaron mi vida de momentos inolvidables. A mi mejor amiga por siempre estar presente a pesar de todo. A mi enamorado, me ayudaste en cada situación que se presentó y me enseñaste a ser una mejor persona. Finalmente, agradezco a los profesores de la ESPOL por compartir sus conocimientos y consejos.

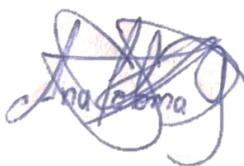
Ana Coloma Guzmán

Agradezco a Dios por las bendiciones que me dio a lo largo de mi vida. A mis padres por siempre estar a mi lado y ser comprensivos en todo momento. A mi familia que siempre confió en mí. A mis amigos que conocí a lo largo de mi vida universitaria con los que aprendí, sufrí, viví, disfruté y compartí momentos que marcaron mi vida. A los profesores de los que aprendí de sus conocimientos y me impulsaron a ser mejor persona.

Diego Palacio Peñafiel

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Ana Belén Coloma Guzmán* y *Diego Paúl Palacio Peñafiel* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Srta. Ana Coloma Guzmán



Sr. Diego Palacio Peñafiel

EVALUADORES

RODOLFO
EZEQUIEL
PAZ MORA

Digitally signed by
RODOLFO EZEQUIEL
PAZ MORA
Date: 2020.06.24
17:07:33 -05'00'

.....
Ing. Rodolfo Paz Mora, MSc.



.....
Ing. Mayken Espinoza Andaluz, PhD.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo realizar el diseño de una línea de reciclaje de papel de menor costo para la elaboración de cartón prensado, dado que se desea tener un método eficiente para reciclar papel que impulse el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en una institución universitaria en la ciudad de Guayaquil. Para este caso la materia prima se consigue directamente del consumo generado en la institución. Esta debe ser separada para su procesamiento por etapas. El papel pasa por un triturado, mezclado con agua, dosificado, secado y cortado para finalmente obtener cartón a un espesor deseado. Se busca que este proceso se realice en un espacio menor en comparación con el requerido por las líneas de reciclaje que se encuentran en el mercado, de manera que sea factible que una universidad la adquiera.

Se realizó una búsqueda de información sobre la pulpa de papel, las variables importantes para su obtención y las condiciones necesarias para obtener un producto de calidad tomando en consideración esto, se utilizó la metodología de diseño para poder determinar la opción óptima a implementar, se siguieron normativas y recomendaciones de DIN, AWS, INEN y AGMA.

Se logró determinar la capacidad que debe tener la línea para cubrir la demanda de papel, se determinaron los elementos necesarios para el funcionamiento de la línea y se diseñó un sistema de mezclado, base estructural para soporte, además de cada etapa que se encuentra involucrada para la obtención de cartón prensado a partir de papel a reciclar. También se estimó el costo para la fabricación de la línea y el tiempo que necesita estar operando para recuperar la inversión.

Se concluye que se logró alcanzar los objetivos planteados aplicando metodologías y consideraciones ingenieriles, obteniendo así una rentabilidad alta para el proyecto.

Palabras Clave: Pulpa de papel, Reciclaje, Cartón prensado, Capacidad, Etapas.

ABSTRACT

The purpose of this project is to design a lower cost paper recycling line for the production of pressboard, given that it is desired to have an efficient method for recycling paper that promotes the fulfillment of the sustainable Development goals (SDGs) at a university institution in the city of Guayaquil. In this case the raw material is obtained directly from the consumption generated in the institution, this should be separated for staged processing. The paper goes through a shredded, mixed with water, dosed, dried and cut to finally get cardboard at a desired thickness. This process is sought to take place in a smaller space compared to that required by the recycling lines on the market, so that it is feasible for a university to acquire it.

A search was carried out for information on the pulp of paper, important variables for obtaining it and the conditions needed to get a quality product, considering this, the methodology design was used to determine the optimal option to implement, DIN, AWS, INEN and AGMA regulations and recommendations were followed.

It was possible to determine the capacity that the line should have to meet the demand for paper, the elements necessary for the operation of the line were determined and a mixing system, structural base for support and each stage involved in obtaining pressboard from paper to be recycled were designed. It was also estimated the cost for manufacturing the line and the time it needs to be trading to payback the investment.

It is concluded that the objectives were achieved by applying methodologies and engineering considerations, thus obtaining a high return for the project.

Keywords: *Paper pulp, Recycling, Pressboard, Capacity, stages.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición del problema.....	2
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Antecedentes.....	4
1.4.2 Proceso de reciclado de papel	4
CAPÍTULO 2.....	9
2 METODOLOGÍA	9
2.1 Identificación de capacidad necesaria.....	9
2.2 Formulación de Alternativas.....	11
2.2.1 Factores y atributos para la selección de alternativas	12
2.2.2 Árbol de funciones y medios.....	12
2.2.3 Tabla morfológica de las alternativas	13
2.3 Matriz de decisión	14
2.4 Diseño Conceptual.....	19

2.5	Diseño detallado	19
2.5.1	Triturado	19
2.5.2	Mezclado	20
2.5.3	Dosificado.....	27
2.5.4	Sistema de transmisión	28
2.5.5	Bancada	38
2.5.6	Prensado y Secado	38
2.5.7	Cortado.....	45
CAPÍTULO 3.....		51
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	51
3.1	Trituradora.....	51
3.2	Tanque.....	51
3.3	Agitador.....	52
3.4	Dosificado	57
3.5	Secado.....	58
3.6	Sistema de transmisión	63
3.6.1	Selección de motor	65
3.6.2	Banda transportadora.....	65
3.7	Simulación de bancada.....	66
3.8	Corte	68
3.8.1	Cuchilla de corte.....	68
3.8.2	Cilindro neumático	69
3.8.3	Compresor.....	70
3.8.4	Estructura para área de cortado	70
3.9	Proyección del reciclado de papel en la institución universitaria.....	72
3.10	Análisis de costos	73
3.11	Impacto social.....	75

3.12	Impacto Ambiental	75
Capítulo 4	77
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
4.1	Conclusiones.....	77
4.2	Recomendaciones	79
Bibliografía	81
APÉNDICES	86

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán para la Normalización)
AWS	American Welding Society
AGMA	American Gear Manufacturers Association
API	Application Programming Interface
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
AISI	American Iron and Steel Institute
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
ASTM	American Society of Testing Materials
SMAW	Shield Metal Arc Welding
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno

SIMBOLOGÍA

ρ	Densidad, kg/m^3
m	Masa, kg
V	Volumen, m^3
t_d	Espesor del tanque, mm
G	Gravedad específica del fluido, -
Re	Número de Reynolds, -
d_a	Diámetro de las paletas del agitador, mm
N_e	Potencia de estado estacionario, W
N_a	Potencia de arranque, W
F	Fuerza aplicada, N
d_e	diámetro del eje, mm
C_r	Capacidad de carga de rodamiento, kN
g	Gravedad, m/s^2
Q	Caudal, m^3/s
c	Coefficiente de descarga, -
F_t	Fuerza tangencial, N
F_{tA}	Fuerza tangencial de arranque, N
μ	Coefficiente de fricción, -
m_v	Rapidez angular entre engranes, -
ω_{out}	Rapidez angular de salida, $r.p.m.$
ω_{in}	Rapidez angular de entrada, $r.p.m.$
m_g	Módulo, -
N_g	Dientes del engrane, -
N_p	Dientes del piñón, -
σ_b	Esfuerzo de flexión, N/m^2
S_{fb}	Resistencia a la fatiga por flexión, N/m^2
n	Factor de seguridad, -
S_{fc}	Resistencia a la fatiga superficial corregida, N/m^2
P	Potencia, W

W_t	Fuerza tangencial, N
v	Velocidad, m/s
Nu	Nusselt, -
Pr	Número de Prandtl, -
k	Coeficiente de conducción, W/mK
h	Coeficiente de convección, W/m^2K
θ_a	Tiempo de secado, min
S	Peso de producto seco, kg
V_s	Velocidad de secado, kg/m^2min
Q_s	Calor sensible, W
Q_L	Calor latente, W
R	Resistencia, K/W
Gr	Número de Grashof, -
q'	Calor total de perdidas, W
τ	Esfuerzo cortante, N/m^2
F_c	Fuerza de corte, N
P_{aire}	Presión de aire, Pa
Q_a	Consumo de aire por minuto, m^3/s

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Gráfica “Cantidad de resmas vs Años”. Representa la cantidad de resmas compradas en los últimos 4 años.	9
Figura 2.2 Gráfica “Cantidad de resmas vs meses”. Representa la cantidad aproximada de resmas compradas en cada mes de los últimos 2 años.	10
Figura 2.3 Esquema de entrada de materia prima y salida de producto final.	11
Figura 2.4 Diseño conceptual basado en la opción B.	19
Figura 2.5 Especificación de relaciones entre medidas del tanque y agitador.	21
Figura 2.6 Gráfica factor N_p del agitador vs Número de Reynolds	23
Figura 2.7 Tabla de aplicaciones en maquinaria y vida requerida según clasificación del servicio	26
Figura 2.8 Medidas de referencia según formato A3.	27
Figura 2.9 Representación de las tensiones.	29
Figura 2.10 Tabla de relación entre dientes para determinación de factor geométrico de Lewis	32
Figura 2.11 Tabla de valores para factor K_a	32
Figura 2.12 Tabla de valores para factor K_m	32
Figura 2.13 Tabla de valores para el índice de calidad	33
Figura 2.14 Gráfica relación velocidad en la línea de paso – índice de calidad y factor K_v	33
Figura 2.15 Gráfica número de ciclos de carga - Factor K_L y dureza del material.	34
Figura 2.16 Tabla de valores para factor K_R según confiabilidad del diseño	35
Figura 2.17 Tabla de propiedades de los materiales a considerar	35

Figura 2.18 Tabla de valores del coeficiente elástico	37
Figura 2.19 Comportamiento de la pasta durante la fase de prensado	39
Figura 2.20 Representación de curvas de secado.	41
Figura 2.21 Representación del corte a realizar.	45
Figura 2.22 Referencia de ángulo para bisel presentado en la Tabla 2.24.	46
Figura 2.23 Representación de diámetros del cilindro neumático.	47
Figura 2.24 Diagrama de Presión en función de Fuerza y diámetro de émbolo	49
Figura 2.25 Diagrama de presión en función del consumo y diámetro de émbolo	50
Figura 3.1 Dimensiones del tanque y el agitador.....	52
Figura 3.2 Especificaciones y características del rodamiento NTN-6805.....	53
Figura 3.3 Resultado de simulación modal del agitador en Software Autodesk Inventor.	54
Figura 3.4 Resultado de simulación del fluido en el tanque mediante software ANSYS Fluent®.....	55
Figura 3.5 Especificaciones del motorreductor W63_10 S2 M2SB2 para el agitador....	56
Figura 3.6 Gráfica Caudal-Cabezal para la selección de una bomba centrífuga de una etapa	56
Figura 3.7 Curva de secado experimental para $T_{\text{aire}}=90^{\circ}\text{C}$ y $V= 6 \text{ m/s}$	58
Figura 3.8 Diagrama del sistema de resistencias.	60
Figura 3.9 Características de la resistencia seleccionada AL006.....	61
Figura 3.10 Referencia de las dimensiones de la resistencia.....	61
Figura 3.11 Especificaciones del ventilador seleccionado HC-31-2T/H	62

Figura 3.12 Referencias de las dimensiones del ventilador HC-31-2T/H	62
Figura 3.13 Dimensiones del ventilador HC-31-2T/H	62
Figura 3.14 Referencia de medidas para la ubicación de los valores presentes en la Tabla 3.12	63
Figura 3.15 Especificaciones del motorreductor W110_100 S2 M2SA6 para el tambor motriz.....	65
Figura 3.16 Resultados de deformación en la bancada.	66
Figura 3.17 Resultado de factor de seguridad.....	67
Figura 3.18 Modelado de la cuchilla con representación de la medida de longitud en [mm]	69
Figura 3.19 Medidas en [mm] de sección transversal de la cuchilla.....	69
Figura 3.20 Resultado de coeficiente de seguridad en la bancada del área de corte. ...	71
Figura 3.21 Resultado de desplazamiento o deformación en la bancada del área de corte.	71
Figura 3.22 Proyección sobre el reciclaje de papel en la institución universitaria.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Cantidad de personal administrativo que la institución provee de papel..	10
Tabla 2.2 Resultados de Encuesta. Promedios de consumo..	11
Tabla 2.3 Resultados de desechos totales en la institución.	11
Tabla 2.4 Tabla de funciones y medios..	12
Tabla 2.5 Tabla morfológica de la sección de triturado para la línea de reciclado.	13
Tabla 2.6 Tabla morfológica de la sección de mezclado para la línea de reciclado.	13
Tabla 2.7 Tabla morfológica de la sección de prensado/secado para la línea de reciclado.	14
Tabla 2.8 Tabla morfológica de la sección de cortado para la línea de reciclado.....	14
Tabla 2.9 Tabla de criterios de evaluación.	15
Tabla 2.10 “Pairwise comparison judgments between elements X and element Y”	15
Tabla 2.11 Asignación de valores para obtener pesos relativos según el criterio principal.	16
Tabla 2.12 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Rendimiento.....	16
Tabla 2.13 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Seguridad.	16
Tabla 2.14 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Forma.	17
Tabla 2.15 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio Ambiental.....	17
Tabla 2.16 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Costos.....	17

Tabla 2.17 Matriz de decisión con criterios de evaluación.	17
Tabla 2.18 Recopilación de características de la opción B, según tablas morfológicas..	18
Tabla 2.19 Parámetros para selección de trituradora.....	20
Tabla 2.20 Cantidad de agua por tonelada de papel producido	21
Tabla 2.21 Clasificación de regímenes según el número de Reynolds	22
Tabla 2.22 Propiedades termofísicas del aire.....	40
Tabla 2.23 Características del papel en prueba experimental.....	45
Tabla 2.24 Ángulos de bisel recomendados en cuchillas guillotinas	46
Tabla 3.1 Especificaciones de la trituradora	51
Tabla 3.2 Valores calculados para el diseño del agitador y la potencia requerida.	53
Tabla 3.3 Características de electrodos para aceros inoxidables según Norma AWS A 5.9 ER 308L.....	55
Tabla 3.4 Características de la bomba centrífuga de una etapa para retorno de agua según selección del catálogo.....	57
Tabla 3.5 Resultados de proporciones para la pasta a dosificar.	57
Tabla 3.6 Resultados de dosificación.	57
Tabla 3.7 Resultados de cálculos para Nusselt y coeficiente de convección.	58
Tabla 3.8 Resultados de calor sensible y latente.	59
Tabla 3.9 Resultado de las resistencias.	60
Tabla 3.10 Resultado de la resistencia de contacto y la suma total de resistencias.	60
Tabla 3.11 Resultado de calor necesario para calentar la cámara.....	61

Tabla 3.12 Datos de los rodillos utilizados en la zona de secado.....	63
Tabla 3.13 Datos de los rodillos guía.	64
Tabla 3.14 Masa de rodillos.....	64
Tabla 3.15 Datos del sistema engrane-piñón.	64
Tabla 3.16 Factores de seguridad del piñón.....	65
Tabla 3.17 Factores de seguridad del engrane.	65
Tabla 3.18 Resultados de las variables y las fuerzas tensoras en la banda.	66
Tabla 3.19 Resultados de propiedades del cartón.	68
Tabla 3.20 Rangos de propiedades para cartones.....	68
Tabla 3.21 Valores de referencia para inicio de iteración.	69
Tabla 3.22 Valores característicos del cilindro neumático CCM2515.....	70
Tabla 3.23 Datos de trabajo, consumo del cilindro neumático y potencia del compresor.	70
Tabla 3.24 Características del compresor RL-03-30	70
Tabla 3.25 Resumen de costos de fabricación.....	74
Tabla 3.26 Resultados de costos de operación para la línea de reciclaje.	74
Tabla 3.27 Gastos anuales de la línea de reciclaje.	75
Tabla 3.28 Resultado de flujo neto para 5 años de operación.....	75
Tabla 3.29 Resultados de indicadores de rentabilidad.	75

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de contaminación a lo largo de la historia hasta la actualidad, el ser humano busca formas y medidas para reducir el impacto ocasionado, por lo que se determinaron sustitutos de la madera en su uso como materia prima en el proceso de elaboración de papel, actualmente se lo encuentra a base de desechos de caña de azúcar, algodón, entre otros (Ervasti, 2016). Otra medida es el reciclaje del mismo, en Ecuador se desea que aumente su implementación en los próximos años ya que los impactos que tiene el reciclaje son múltiples, está presente de manera económica, ecológica y cultural, logrando que 20000 familias se beneficien a nivel nacional (Ministerio del ambiente, 2018).

Alcanzar sostenibilidad con la implementación de estas medidas, forja a su vez conciencia sobre el consumo responsable. Las aplicaciones que se pueden obtener para los productos generados a partir de papel reciclado son variadas y cabe recalcar que el papel de segundo uso (reciclado) no es nocivo para el ser humano ni por químicos o patógenos (Bajpai, 2014). Se conoce que en el país es un campo no explotado debido a la poca separación de los desechos sólidos al momento de su recolección y disposición por falta de cultura o conciencia ecológica.

El papel forma parte del diario vivir de las personas, ya sea para uso laboral, estudiantil, cultural o artístico; es un material con alta capacidad de reciclaje y una base para el sector productivo, por lo cual los gobiernos autónomos descentralizados municipales tienen activo un proyecto de recolección y separación de residuos reciclables (Ministerio del ambiente, 2019). Muchas ciudades están dando grandes pasos para su implementación, desde la colocación de tachos de basura individuales para reciclaje hasta la puesta en marcha de máquinas que tienen como función canjear elementos reciclables por pasajes en servicios de transporte, evitando así que estos se mezclen con los residuos orgánicos, reduciendo la contaminación e incentivando la participación de la sociedad.

El papel es catalogado como producto de primera necesidad desde el Siglo II (Aguilar, 2004), donde inicialmente se fabricaba a base de residuos de tela, su demanda fue incrementando a pasos agigantados por lo que la industria tuvo la necesidad de buscar otro tipo de materia prima que permita su producción en masa, esto llevó a su elaboración con madera, ya que esta contiene fibras celulósicas necesarias para la elaboración del papel al igual que la tela, sin embargo, la madera las contiene en mayor cantidad lo que permite facilidad en la extracción y el incremento en cantidad de materia prima.

1.1 Definición del problema

En Guayaquil-Ecuador se producen 3900 toneladas de desechos diarios, de las cuales por el momento solo se puede reciclar un 13% (Ecuavisa, 2019). Para aportar con la disminución del desecho de papel constantemente se digitalizan facturas, documentos y más, sin embargo, el sector educativo tiene una gran necesidad de uso de papel, institutos consumen altas cantidades para la toma de exámenes, comunicados entre puestos administrativos y publicidad interna (Isaev, Clark & Davidson, 2010). Una línea de reciclado de papel puede ocupar grandes cantidades de espacio o necesitar, en ciertas fases, exposición al sol y a nivel de universidades a pesar de tener alto consumo de papel, adquirir las maquinarias que presenta el mercado no sería una opción justificable debido a su alto costo.

Algunas instituciones en la ciudad cuentan con programas sobre concientización, no obstante, se busca el desarrollo e implementación de sistemas que les permita reutilizar sus residuos de papel y a su vez mostrar el procedimiento para hacer conciencia de lo viable que son estas soluciones, incentivando la correcta disposición de los desechos, además de la disminución de su uso innecesario.

1.2 Justificación del proyecto

Guayaquil se encuentra activamente participando en el cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS), los cuales no solo impulsan a reducir varios problemas radicales, sino que gran parte se enfoca en el cuidado

ambiental, ya que este se ve envuelto en cada ámbito relacionado con el desarrollo (PNUD, 2015).

Un correcto manejo de residuos es un paso en la dirección correcta, por lo que acercar el proceso de reciclado al origen del problema es una solución viable. Los ODS no solo significan un cambio sino también progreso, es así que incentivan a las instituciones a informar y encontrar nuevos métodos para lograr un desarrollo sostenible, de manera que, la implementación de una línea de reciclado con menor costo, que ocupe menos espacio y cubra la demanda de los desechos de papel generados en una universidad dando la oportunidad a reutilizarlo en otras presentaciones, no solo impulsa el objetivo de desarrollar comunidades sostenibles sino también aporta a la demostración de los métodos alternativos que se espera sean utilizados con mayor frecuencia para reducir la contaminación y a su vez disminuir el consumo energético en hasta un 27% con referencia a la maquinaria que produce papel a base de fibra virgen (Bajpai, 2014). Con esto, se logra promover el consumo responsable, además de hacer un llamado al aprendizaje y mejora de los diferentes métodos para reciclar papel empleando nuevas tecnologías que aporten a la obtención de mejores resultados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una línea de reciclado de papel de menor costo para la elaboración de cartón prensado usando como base el desecho de papel en una institución universitaria, reduciendo el impacto ambiental e incentivando el consumo responsable.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Dimensionar los elementos mecánicos necesarios para el correcto funcionamiento de la línea de reciclado.
2. Seleccionar los componentes imprescindibles de la línea de reciclado.
3. Plantear el sistema del proceso de reciclado de papel de manera que a un menor tamaño logre satisfacer la demanda.
4. Proyectar la cantidad de reciclaje de papel en la institución.

5. Modelar la línea de reciclado de papel de menor costo.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

La madera presenta fibras celulósicas en mayor proporción que otros materiales lo que permite facilidad en la extracción y el incremento en cantidad de materia prima para la fabricación de papel (Martinez & Hidalgo, 2010). Debido a su uso excesivo nació el reciclaje de papel como medio alternativo para contrarrestar el impacto ambiental de esta industria, con los avances generados el reciclaje ha llegado a disminuir la contaminación de agua durante el procedimiento en un 35% en comparación con la industria de papel virgen (Misman, Wan Alwi, & Manan, 2008), con resultados como estos la industria del reciclaje crece año a año.

1.4.2 Proceso de reciclado de papel

El proceso de reciclado de papel tiene varias etapas, cada una presenta diferentes consideraciones que dependen del tipo de producto que se requiera obtener. El tamaño de estas se determina a partir de la magnitud de producción, estado en que se encuentra la materia prima, restricciones de tamaño y otras variantes especificadas por el cliente.

Existen 2 formas generales de clasificar el procesamiento del papel utilizado, artesanal e industrial, por el método artesanal se procesa el papel triturándolo de manera manual y mezclándolo con agua en licuadoras, esta mezcla se coloca sobre un bastidor o conjunto de telas, a la que posteriormente se da un movimiento de balanceo para mejorar la uniformidad y remover agua sobrante. La mezcla es comprimida utilizando rocas o ladrillos que proporcionen peso para extraer la mayor cantidad de agua posible. Finalmente, se cuelga lo obtenido para su secado al aire libre (Bhattacharjee & Kamrul Islam, 2014).

Por medios industriales el papel no se clasifica necesariamente de otros restos reciclables en su totalidad, este es mezclado de manera inmediata utilizando maquinarias a diferentes niveles y tamaños, la composición del resultado pasa

por pruebas de calidad, además la preparación de la mezcla puede llegar a durar horas, este método está dirigido a la producción en masa de papel reciclado, ya sea en su totalidad o que contenga solo un porcentaje de papel utilizado, cada etapa es supervisada y ejecutada con equipos en su mayoría automatizados, cada sección se detalla a continuación.

1.4.2.1 Recolección

El papel en universidades se recolecta a partir de los diferentes tachos de reciclaje, en donde los principales separan papel, plástico y residuos orgánicos. Por otro lado, existen iniciativas que determinan la ubicación de puntos estratégicos en donde se colocan puestos para recolectar donaciones de cuadernos, hojas de copias u otros derivados del papel ya utilizado y así asegurar su correcta disposición. En el sector administrativo de las instituciones los papeles utilizados se trituran por medio de máquinas de oficina, posterior a esto se procede a depositarlo en tachos esperando su acumulación. Al realizar este proceso de separación se asegura la poca exposición a otros desechos.

La recolección de papel debe realizarse con una clasificación con el fin de mejorar la eficiencia del proceso. La norma EN 643:2014 cataloga por grados cada tipo de papel y sus derivados, dando características de este, además de porcentajes que restringen la presencia de otro tipo de materiales entre lo recolectado. Dependiendo de la clasificación se determina el manejo, método y consideraciones de reciclaje próximas a utilizar (CEPI, ERPA & FEAD, 2014).

1.4.2.2 Triturado

El papel se tritura dependiendo de diferentes factores, entre los principales está el grado de corte, el cual se asigna según el tamaño al que salen los pedazos de papel después de ser triturados, a mayor diversidad en presentaciones del papel y grosores se define entre realizar un triturado o pasar directo a la fase de mezclado, saltar este paso no solo hace que el proceso de reciclado tome mayor tiempo también compromete la calidad

de la mezcla y es directamente proporcional al tamaño de la maquinaria necesaria, ya que si se pasa directo a un mezclado general, la potencia y magnitud deberá ser mayor en comparación al requerido de esta fase.

En instituciones universitarias se manejan varios documentos de manera confidencial, esto se realiza en áreas administrativas por emisión de solicitudes, comunicados y otros temas. Por lo que para el manejo de los mismos existe la norma UNE-EN 15713, la cual especifica hasta 8 diferentes tipos de triturado, estos se aplican dependiendo del contenido que se puede encontrar en los documentos, como valores económicos, nombres de terceros, información confidencial, entre otros. Es decir, la clasificación previa del contenido influye en el manejo de los papeles y el tamaño al cual será reducido para posteriormente ser procesado. Debido a esto, esta fase debe ser considerada al tratar el manejo de residuos reciclables en diferentes instituciones. (Normalización Española, 2010)

1.4.2.3 Mezclado

Para lograr un correcto proceso de reciclado, el papel debe ser convertido en pulpa, es decir reducirse a fibras. Cada tipo de papel contiene diferentes proporciones o tamaños de fibras (largas, cortas). Para lograr su obtención se agita y revuelve de manera continua el papel con agua. Por otra parte, se le adhieren productos químicos que garantizan la separación de la tinta con las fibras (Misman, Wan Alwi, & Manan, 2008).

Durante el mezclado existen diferentes variaciones en proporción papel-agua, se debe considerar que las fibras cambian de tamaño durante la agitación, a esto se le denomina acortamiento de fibra, se presenta al momento del choque entre fibras o contra las paletas de la máquina debido al fluido pasando a gran velocidad (Da Silva, 2009), cabe recalcar que un balance entre el tamaño de las fibras es una condición óptima por lo que su acortamiento debe ser reducido o manejado con respecto al grado del papel a mezclar, debido a esto se incrementa o disminuye la cantidad de papel en comparación con el tamaño de las paletas, a mayor roce entre fibras el

acortamiento es menor a diferencia del generado al momento del choque de las mismas con las paletas.

Dependiendo de las proporciones se obtiene un tiempo de mezclado para lograr homogeneidad, debido a la gran variedad de mezclas el tiempo es determinado a base de pruebas variando cantidades, generalmente al momento de presentar la homogeneidad requerida, el tiempo se establece considerando el número de revoluciones realizadas por el impeler o paleta para alcanzar ese punto (Atiemo-Obeng, Paul & Kresta, 2004). Con estas pruebas se extrapola el tiempo a diferentes proporciones de la mezcla.

1.4.2.4 Dosificación

Se realiza al suministrar en cantidades específicas la pulpa sobre bandas transportadoras o filtros para su posterior tratamiento y se puede realizar de manera intermitente o continua; la dosificación continua se da a nivel industrial al momento de realizar una producción totalmente automatizada en donde cada parámetro es medido a través de sensores de temperatura, presión, caudales y más, esto se monitorea a lo largo de todas las etapas (Interempresas, 2006). Sin embargo, en la mayoría de los procesos se presenta solo en la etapa de transportación, donde cierta cantidad de mezcla sale a un determinado ritmo para su procesamiento y se regula según el espesor a alcanzar.

1.4.2.5 Prensado y secado

El grosor que toma la pulpa generada por la alta cantidad de agua contenida no es el adecuado, debido a esto existe la necesidad de prensar la mezcla para de alcanzar un espesor deseado, el cual depende de la aplicación que tendrá el producto, este espesor se obtiene al comprimir la pulpa y extraer el agua, logrando una unificación de la mezcla además de darle forma al producto final.

El prensado y secado se puede realizar como operaciones separadas, sin embargo, para evitar el uso de distintas máquinas se lo implementa como

un solo proceso en el cual se aplica un prensado rotativo en caliente, el mismo consiste en una serie de cilindros calientes que ejercen presión entre ellos obteniendo como resultado la compactación de la pulpa que pasa a través de dichos cilindros y la eliminación de agua, estos rodillos pueden ser calentados por vapor o resistencias (Koski, 1992).

Cuando se realiza el prensado y secado por separado, la prensa utilizada suele ser de tipo hidráulica plana, esta no necesariamente se calienta, por lo que con la acción del compactado debe extraer aproximadamente 50-55% de la humedad presente en el cartón. los rodillos por otro lado, pasan a formar parte netamente de la sección de secado, debido al proceso anterior el contacto con la pulpa previamente prensada es suficiente para lograr alcanzar una adecuada eliminación de agua, no es necesario pero resulta eficiente ejercer presión entre los mismos, logrando obtener al finalizar la fase niveles de humedad de 5-7% (Teschke & Demers, 1998). Si el proceso no llega a estos niveles en el cartón se puede agregar una cámara de secado a vapor para asegurar el resultado, no obstante, uno de los principales costos de producción se lo acredita a la generación de vapor (Moreno, 2006), por lo que esto representa una alternativa a considerar por el cliente y a su vez un complemento a las restricciones que se otorguen a esta fase.

1.4.2.6 Corte

Existen diferentes métodos y tamaños para realizar el corte de cartón prensado, su implementación depende del producto final que se requiera, en su mayoría este proceso se realiza de manera separada de tal forma que se realiza un corte con cuchilla al final de la línea de producción con intervalos de tiempo que dan como resultado una distancia establecida y posterior a esto dependiendo del producto se procede con otros cortes. Las principales características para considerar en el corte son la distancia de recorrido de la cuchilla y la potencia de corte (Qiong Chen & Yuanjun Lv, 2008).

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA

2.1 Identificación de capacidad necesaria

Para lograr identificar la magnitud que requiere el diseño y poder establecer las diferentes alternativas de manera adecuada, se procedió a estimar la cantidad de residuos de papel generado en la institución universitaria.

Para esto el departamento de compras proporcionó un aproximado de la cantidad de pedidos de resmas papel bond 75 gr/m² realizados en los últimos 4 años.

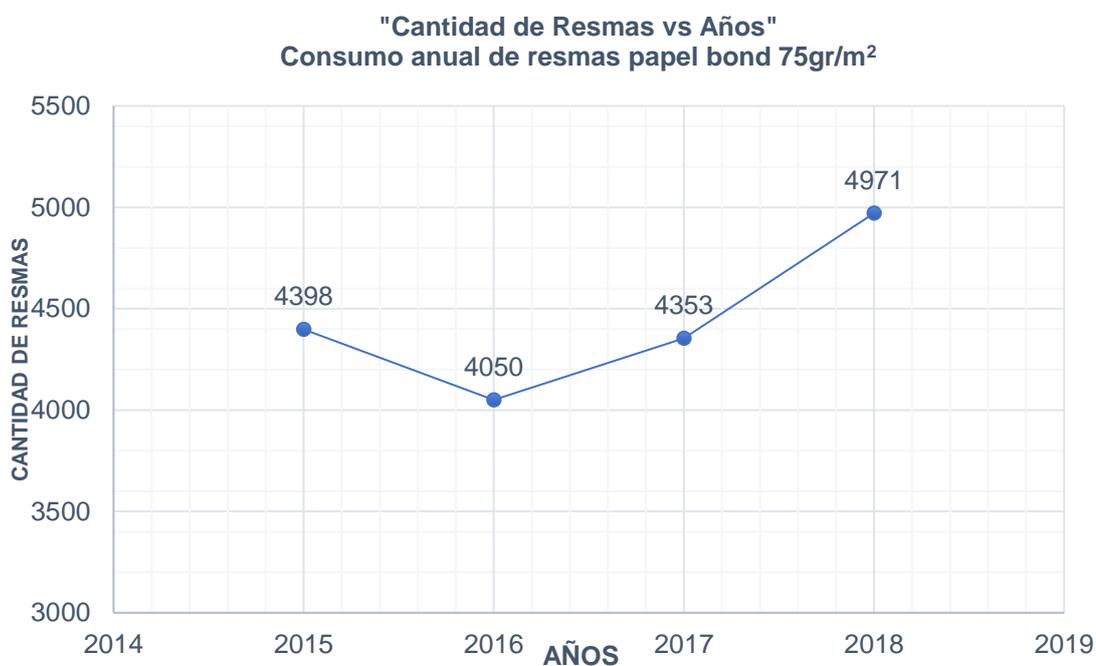


Figura 2.1 Gráfica “Cantidad de resmas vs Años”. Representa la cantidad de resmas compradas en los últimos 4 años. Fuente: Elaboración propia

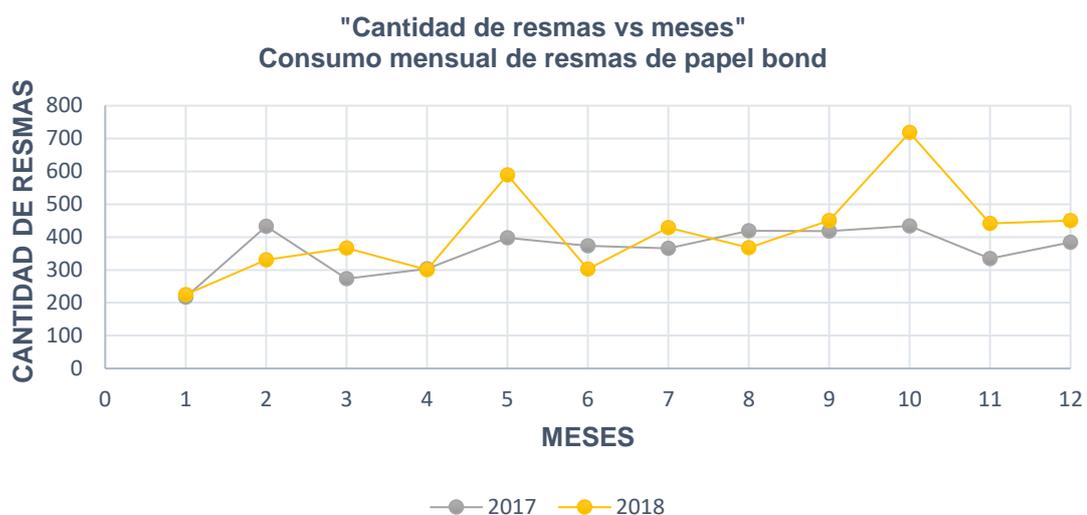


Figura 2.2 Gráfica “Cantidad de resmas vs meses”. Representa la cantidad aproximada de resmas compradas en cada mes de los últimos 2 años. Fuente: Elaboración propia

Estos datos no fueron suficiente para iniciar con el diseño conceptual debido a que había el riesgo de sobredimensionamiento, por lo que se procedió a realizar una encuesta en toda la institución para determinar la cantidad promedio de papel desechado. El sector administrativo maneja el papel utilizado con mayor organización, dado esto se calculó una muestra a partir de la cantidad de personal administrativo en cada facultad y a cargo de otros sectores generales en la universidad.

Tabla 2.1 Cantidad de personal administrativo que la institución provee de papel.

Fuente: Elaboración propia

Personal	Cantidad de personal
Administrativo general	360
Facultades	80
Total	440
Total de muestra	80

Tabla 2.2 Resultados de Encuesta. Promedios de consumo. Fuente: Elaboración propia

	Resmas utilizadas mensual por los encuestados	Hojas desechadas al día por los encuestados	Promedio de consumo mensual de resmas por persona	Promedio de hojas desechadas al día por persona
Facultades	67.50	137	1.77	3.60
Administrativo general	166.13	199	3.95	4.74

Como se puede observar en la Tabla 2.2, se obtuvo a partir de los resultados el promedio de desecho por persona, por lo que se procedió a estimar los valores totales de desechos generados por el personal administrativo en la institución, obteniendo así los datos presentados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Resultados de desechos totales en la institución. Fuente: Elaboración propia

Resmas desechadas al mes	79.78
Hojas desechadas al mes	39888
Hojas desechadas diarias	1994.40
Promedio de kilogramos de papel desechados al mes [kg]	183.49

2.2 Formulación de Alternativas

Se definió de forma estructurada la línea de producción con todos los procesos que requiere el reciclado de papel, con esto se procedió a plantear las alternativas para el cliente y usuario que cumplan con los requerimientos establecidos.

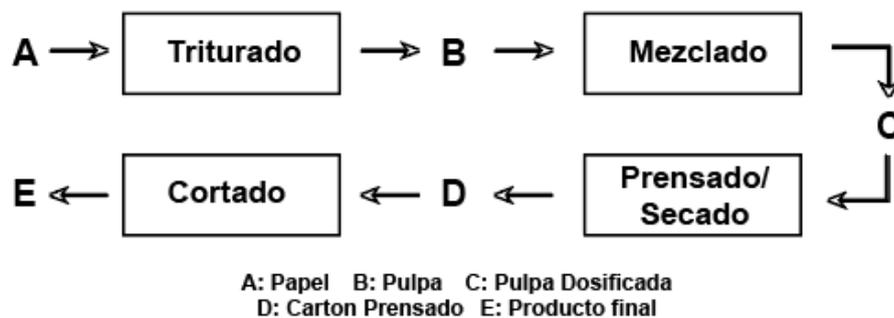


Figura 2.3 Esquema de entrada de materia prima y salida de producto final.

Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Factores y atributos para la selección de alternativas

Se determinó los factores necesarios a considerar para la selección de alternativas, la lista presentada a continuación, contiene características generales que se tomaron en consideración para la evaluación de propuestas para cada etapa de la línea de reciclado.

- Material
- Nivel de seguridad
- Geometría
- Mantenimiento
- Capacidad de reciclado
- Tiempo de vida
- Manufacturabilidad

2.2.2 Árbol de funciones y medios

Se realizó un análisis de funciones y medios con respecto a cada una de las etapas presentadas en la Figura 2.3, se consideraron los objetivos que tiene cada etapa con lo que se logró especificar sus respectivas funciones.

Tabla 2.4 Tabla de funciones y medios. Fuente: Elaboración propia

Fase	Objetivo	Funciones	Medios	
Triturado	Triturar la cantidad de papel establecida por día	Realizar corte cruzado	Martillos	Cuchillas
		Agarre de múltiples hojas	Pinzas	Cuchillas
Mezclado	Mezclar de forma homogénea la pulpa de papel	Homogenizar la mezcla	Agitador	-
		Almacenar la cantidad necesaria	Tanque	-
Prensado/Secado	Prensar y secar de manera eficiente la pulpa de papel	Remover el excedente de líquido	Prensa hidráulica	Prensa de tornillo
		Remover la humedad	Secado a vapor	Secado con resistencias
Cortado	Cortar	Dar medidas al producto	Tijeras	Cuchilla

2.2.3 Tabla morfológica de las alternativas

Las 4 etapas de proceso presentadas en la Figura 2.3 fueron analizadas, dando como resultado la propuesta de diferentes métodos o alternativas para cada sección, por esto se representó una tabla por etapa, tomando en consideración que las opciones de cada etapa están enlazadas, facilitando así la evaluación posterior.

Tabla 2.5 Tabla morfológica de la sección de triturado para la línea de reciclado.

Fuente: Elaboración propia

	Opción A	Opción B	Opción C
Nivel de seguridad	Medio	Bajo	Alto
Geometría de la herramienta de corte para la trituradora	Tipo Martillo	Tipo Cuchilla	Tipo disco
Tipo de corte	Corte en tiras	Corte cruzado	Corte macro
Rango de costo de la trituradora según el tipo de cuchilla	\$890-\$2600	\$100-\$1000	\$1000-\$15000

Tabla 2.6 Tabla morfológica de la sección de mezclado para la línea de reciclado.

Fuente: Elaboración propia

	Opción A	Opción B	Opción C
Nivel de seguridad	Alto	Alto	Alto
Geometría del tanque	Cilindro orientación horizontal	Cilindro orientación vertical	Doble cono
Tipo de paleta	Compuerta	Abatible	Hélice
Sistema de transmisión de potencia	Banda-Polea	Engrane-Piñón	Engrane-Cadena

Tabla 2.7 Tabla morfológica de la sección de prensado/secado para la línea de reciclado.

Fuente: Elaboración propia

	Opción A	Opción B	Opción C
Nivel de seguridad	Alto	Medio	Alto
Geometría de la prensadora	Plana	Rodillo	De tijera
Tipo de secado	Vapor	Aire caliente	Resistencias térmicas
Sistema de transmisión de potencia	Banda-Polea	Engrane-Piñón	Engrane-Cadena

Tabla 2.8 Tabla morfológica de la sección de cortado para la línea de reciclado.

Fuente: Elaboración propia

	Opción A	Opción B	Opción C
Nivel de seguridad	Alto	Alto	Bajo
Geometría de la cortadora	Rodillo	Plana	Plana
Tipo de cuchilla	Corto alcance	Guillotina-Cizalla	Guillotina-Cizalla
Tipo de accionamiento	Troquelado	Pistón	Manual

2.3 Matriz de decisión

Una matriz de decisión es un método utilizado para evaluar las diferentes alternativas en base a criterios enfocados a requerimientos (Comesaña, 2013), se procedió a seleccionar los criterios de evaluación más importantes, los cuales presentan subdivisiones en los que constaran los puntos de segundo grado de importancia.

Tabla 2.9 Tabla de criterios de evaluación. Fuente: Elaboración propia

Criterios para evaluar	
1	Rendimiento
1.1	Cantidad de producción
1.2	Uso de prensa
1.3	Cantidad de rodillos
1.4	Tiempo de secado
2	Seguridad
2.1	Medidas de seguridad durante la operación
2.2	Equipos de protección personal
2.3	Capacitaciones de uso del equipo
3	Forma
3.1	Material
3.2	Geometría del tanque
3.3	Geometría del sistema de prensado
3.4	Geometría del sistema de secado
3.5	Sistema de transmisión de potencia
4	Ambiental
4.1	Manejo de desechos
4.2	Consumo energético
5	Costos
5.1	Costos de materiales
5.2	Costos de manufactura
5.3	Costos de mantenimiento
5.4	Costos de repuestos

Como se describió en la tabla anterior, se determinaron cinco puntos importantes para los criterios de evaluación, los mismos que se implementaron para la evaluación en la matriz de decisión, utilizando el método de factores ponderados. Este consistió en la asignación de valores para la clasificación de parámetros por importancia (Jadhav & Sonar, 2011), en la comparación se consideró la siguiente tabla.

Tabla 2.10 “Pairwise comparison judgments between elements X and element Y”
(Jadhav & Sonar, 2011)

Judgment	Values
X is equally preferred to Y	1
X is moderately preferred over Y	3
X is strongly preferred over Y	5
X is very strongly preferred over Y	7
X is extremely preferred over Y	9
Intermediate Values	2,4,6,8
Preference of Y compared to X	1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9

Una vez asignados los valores, se procedió a realizar el cálculo del total y total relativo, estos determinan la importancia de cada criterio y posteriormente de los subcriterios. Para esto se sumaron los valores de las columnas, obtenido así un total general, el cual fue utilizado para el ponderado de todas las características. Los valores totales individuales se relacionaron con el valor total acumulado para la obtención de un total relativo, este representa de manera porcentual la relevancia de cada criterio sobre otro, por lo que se obtuvo así lo necesario para la asignación de valores en la matriz de decisión.

Tabla 2.11 Asignación de valores para obtener pesos relativos según el criterio principal.

Fuente: Elaboración propia

Criterio	1	2	3	4	5	Total	Total relativo
1	1	1/3	5	1/7	1/7	6.61	0.12
2	3	1	3	1/3	1	8.33	0.17
3	1/5	1/3	1	1/5	1/5	1.93	0.04
4	7	3	5	1	3	19	0.38
5	7	1	5	1/3	1	14.33	0.29
Total						50.20	1

Tabla 2.12 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Rendimiento. Fuente: Elaboración propia

Criterio	1.1	1.2	1.3	1.4	Total	Total relativo	Total Absoluto
1.1	1	5	3	1	10	0.35	0.042
1.2	1/5	1	1/5	1/3	1.73	0.06	0.007
1.3	1/3	5	1	5	11.33	0.40	0.048
1.4	1	3	1/5	1	5.2	0.19	0.023
Total					28.26	1	0.12

Tabla 2.13 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Seguridad. Fuente: Elaboración propia

Criterio	2.1	2.2	2.3	Total	Total relativo	Total Absoluto
2.1	1	1	1	3	0.33	0.056
2.2	1	1	1	3	0.33	0.056
2.3	1	1	1	3	0.33	0.056
Total				9	1	0.17

Tabla 2.14 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Forma. Fuente: Elaboración propia

Criterio	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	Total	Total relativo	Total Absoluto
3.1	1	5	1	3	1/3	10.33	0.25	0.01
3.2	1/5	1	1/3	1/5	1/3	2.07	0.05	0.002
3.3	1	3	1	1/3	3	8.33	0.20	0.008
3.4	1/3	5	3	1	3	12.33	0.30	0.012
3.5	3	3	1/3	1/3	1	7.67	0.20	0.008
Total						40.73	1	0.04

Tabla 2.15 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio Ambiental. Fuente: Elaboración propia

Criterio	4.1	4.2	Total	Total relativo	Total Absoluto
4.1	1	5	6	0.83	0.32
4.2	1/5	1	1.2	0.17	0.06
Total			7.2	1	0.38

Tabla 2.16 Asignación de valores para obtener pesos absolutos de subcriterios según el criterio de Costos. Fuente: Elaboración propia

Criterio	5.1	5.2	5.3	5.4	Total	Total relativo	Total Absoluto
5.1	1	1/3	5	1/3	6.67	0.26	0.08
5.2	3	1	3	1/3	7.33	0.28	0.08
5.3	1/5	1/3	1	1/3	1.87	0.07	0.02
5.4	3	3	3	1	10	0.39	0.11
Total					25.87	1	0.29

Tabla 2.17 Matriz de decisión con criterios de evaluación. Fuente: Elaboración propia

Criterios para evaluar			Opción A		Opción B		Opción C	
1	Rendimiento	0.12	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración
1.1	Cantidad de producción	0.042	3	0.126	3	0.126	3	0.126
1.2	Uso de prensa	0.007	1	0.007	4	0.028	2	0.014
1.3	Cantidad de rodillos	0.048	0	0	4	0.192	0	0
1.4	Tiempo de secado	0.023	3	0.069	3	0.069	4	0.092
2	Seguridad	0.17	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración
2.1	Medidas de seguridad durante la operación	0.056	3	0.168	2	0.112	3	0.168
2.2	Equipos de protección personal	0.056	4	0.224	4	0.224	4	0.224

2.3	Capacitaciones de uso del equipo	0.056	4	0.224	4	0.224	4	0.224
3	Forma	0.04	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración
3.1	Material	0.01	4	0.04	4	0.04	4	0.04
3.2	Geometría del tanque	0.002	2	0.004	3	0.006	2	0.004
3.3	Geometría del sistema de prensado	0.008	0	0	3	0.024	1	0.008
3.4	Geometría del sistema de secado	0.012	2	0.024	2	0.024	3	0.036
3.5	Sistema de transmisión de potencia	0.008	3	0.024	3	0.024	3	0.024
4	Ambiental	0.38	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración
4.1	Manejo de desechos	0.32	3	0.96	3	0.96	3	0.96
4.2	Consumo energético	0.06	3	0.18	3	0.18	3	0.18
5	Costos	0.29	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración	Puntaje Asignado	Valoración
5.1	Costos de materiales	0.08	3	0.24	2	0.16	3	0.24
5.2	Costos de manufactura	0.08	2	0.16	3	0.24	2	0.16
5.3	Costos de mantenimiento	0.02	2	0.04	3	0.06	2	0.04
5.4	Costos de repuestos	0.11	2	0.22	4	0.44	2	0.22
Total					2.71		3.13	2.76

Se elaboró una matriz más compacta, debido a que se tomó en consideración que las opciones presentes en las tablas morfológicas y clasificadas de cada etapa se relacionan entre procesos para obtener un producto de manera eficiente, con esto y los valores de importancia, se logró determinar a la opción B como óptima a implementar.

Tabla 2.18 Recopilación de características de la opción B, según tablas morfológicas.

Fuente: Elaboración propia

Opción B	Trituradora con herramienta de corte tipo cuchilla	Tanque cilíndrico con orientación vertical	Prensado por rodillo	Cortadora plana
	Trituradora con corte cruzado	Agitador de paleta abatible	Secado por aire caliente	Cuchilla tipo guillotina-cizalla

2.4 Diseño Conceptual

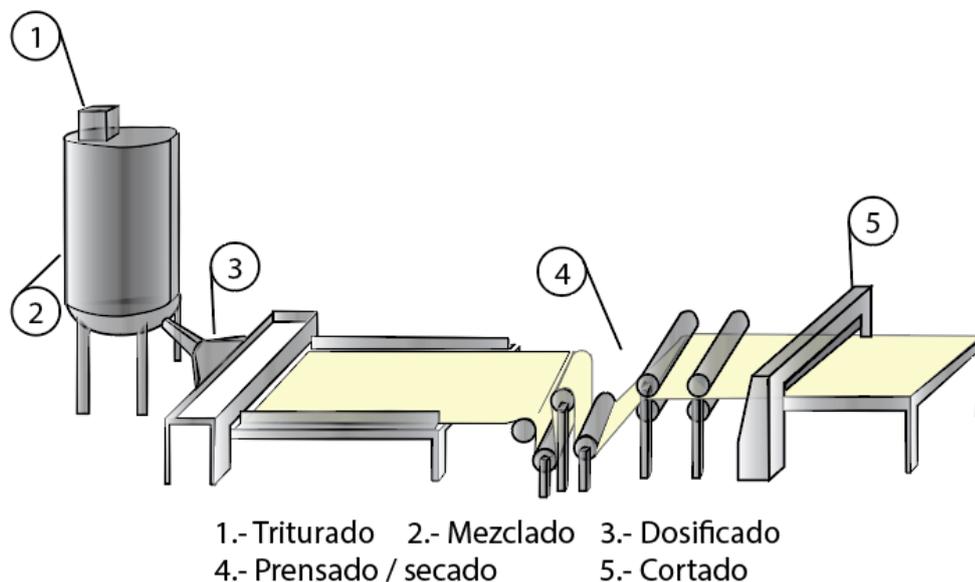


Figura 2.4 Diseño conceptual basado en la opción B. Fuente: Elaboración propia

2.5 Diseño detallado

En el diseño detallado se tomaron consideraciones físicas y mecánicas para cada sección de la línea de reciclado, es decir, se realizó una evaluación de las etapas pertinentes ya antes mencionadas en este capítulo.

2.5.1 Triturado

La primera fase se basó en el triturado de papel, el aporte de la materia prima proviene de los edificios administrativos de la institución, por lo que se consideró el aspecto legal al momento de desechar los documentos. Para esto se identificó una norma que permitió determinar el tamaño del triturado que se

debe alcanzar según el tipo de información que contiene los documentos a procesar. Finalmente, al establecer los parámetros se procedió a la selección de un equipo que cumpla con las especificaciones necesarias para el tipo de corte y capacidad.

Tabla 2.19 Parámetros para selección de trituradora. Fuente: Elaboración propia

Parámetros	
Normas	DIN 32757-1 / DIN 66399
Tipo de corte	Partícula
Capacidad de triturado al día	1 a 3000 páginas/día

2.5.2 Mezclado

Se realizó el diseño del mezclador considerando 2 elementos:

1. Diseño del tanque
2. Diseño del agitador

Cabe recalcar que se tomó como referencia la capacidad necesaria aproximada mediante encuestas, llegando a la conclusión de diseñar a un 200% para abarcar el crecimiento de reciclaje a futuro y debido a la gran diferencia que existe en las respuestas entre los datos de entrada de papel y salida.

2.5.2.1 Diseño del tanque

El volumen requerido para el tanque se determinó tomando en consideración el volumen de papel y de agua a la entrada.

Por medio de la ecuación de densidad (ρ) y utilizando el valor de la masa del papel (m), se determinó el volumen (V) del mismo.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

La relación de proporción para la pulpa con respecto al agua y papel fue seleccionada en base a estudios realizados por la Cámara de Papel de México y Greenpeace. Se obtuvieron los valores de consumo de agua según el grado de calidad de la pulpa.

Tabla 2.20 Cantidad de agua por tonelada de papel producido (Area, 2008; Greenpeace, 1997)

Materia Prima	Papel calidad Premium	Papel calidad ordinaria	Papel reciclado
Agua	40 m ³	15 m ³	2 m ³

Por medio de la ecuación de volumen de un cilindro se fijaron valores para el tanque y a su vez con dichas dimensiones se pudo determinar las medidas de las palas del agitador adecuado.

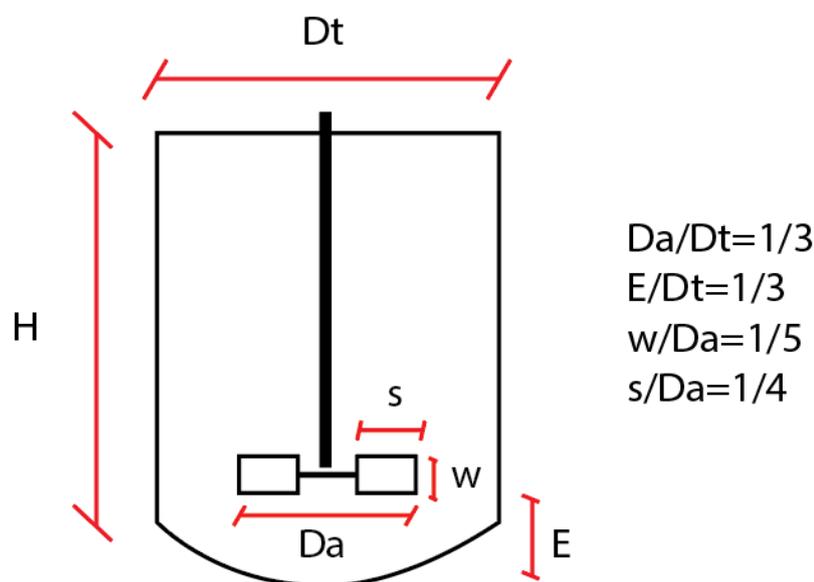


Figura 2.5 Especificación de relaciones entre medidas del tanque y agitador.

Fuente: Elaboración propia

2.5.2.1.1 Espesor de la plancha del tanque

Para la determinación del espesor necesario del tanque se utilizó:

$$t_d = \frac{2.6D_t(H-1)G}{S_d} + ca \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 es establecida por la norma API 650, la misma que analiza las propiedades físicas del material a emplear. Donde el espesor

(t_d) de la lámina de acero para el diseño del tanque, se determina por medio del diámetro nominal del tanque (D_t), la altura de diseño de líquido permitido (H) y la gravedad específica del fluido (G) dividido para el esfuerzo permisible del material (S_d) más la tolerancia de la corrosión (ca). Cabe recalcar que la ecuación debe ser utilizada con valores en el sistema inglés.

2.5.2.1.2 Soldadura del tanque

El proceso de soldadura a utilizar se estableció mediante la norma AWS A 5.9 ER 308L, la misma que clasifica el tipo de soldadura para diferentes materiales, para el caso de acero inoxidable establece GTAW y presenta la recomendación del uso de gas tungsteno para acero tipo 304.

2.5.2.2 Diseño del agitador

En primer lugar, se determinó el régimen que tiene el fluido durante la constante agitación, esto se obtuvo por medio del número de Reynolds.

$$Re = \frac{ND_a^2\rho}{\mu} \quad (2.3)$$

Donde el número de Reynolds (Re) se determina a partir de la velocidad angular (N), el diámetro total de las paletas del agitador (D_a), la densidad del fluido (ρ) y la viscosidad dinámica (μ).

Tabla 2.21 Clasificación de regímenes según el número de Reynolds (M. White, 2004)

Laminar	≤ 2300
Transitorio	$2300 < Re < 4000$
Turbulento	≥ 4000

2.5.2.2.1 Potencia del agitador

Para la obtención de la potencia necesaria para el movimiento del agitador en el tanque mezclador, se procedió a determinar la potencia de estado estable (Neyra, Trigoso & Santa María, 2013).

$$N_e = N_p \rho N^3 D_a^5 \quad (2.4)$$

La potencia de estado estacionario (N_e) se obtiene por medio del factor (N_p) multiplicado por la densidad del fluido (ρ), la velocidad angular (N) en r.p.s. y el diámetro (D_a).

N_p es un factor que depende del Reynolds y el número de palas del agitador, por esto se determinó a partir de la gráfica presente en la Figura 2.6. Para luego calcular la potencia necesaria a emplear.

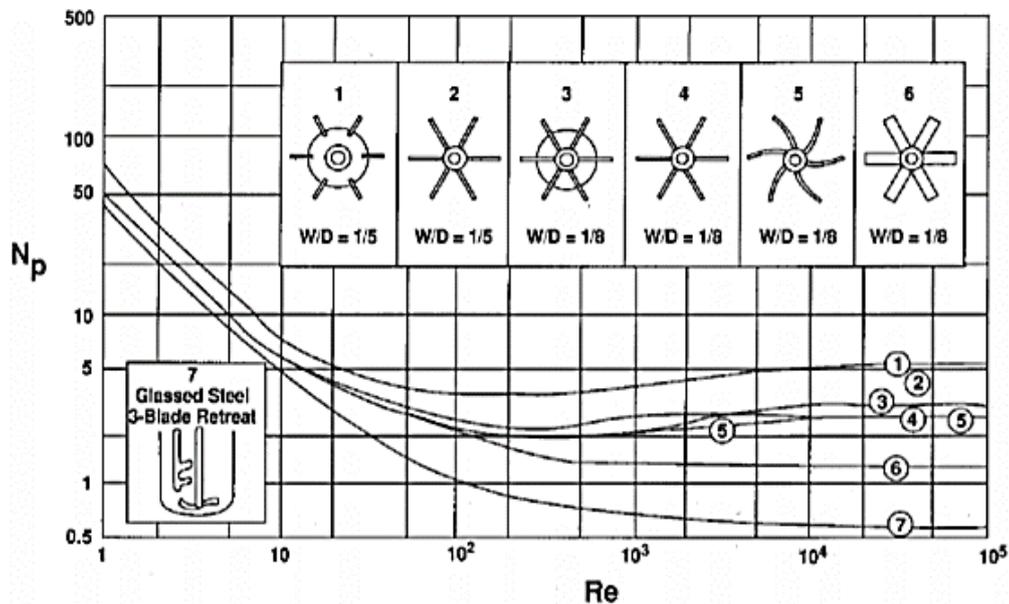


Figura 2.6 Gráfica factor N_p del agitador vs Número de Reynolds

(Paul, Atiemo-Obeng & Kresta, 2003)

Posteriormente, se determinó la potencia de arranque (N_a), esta es igual a 2 veces la potencia de estado estable (N_e) según la ecuación presentada a continuación (Neyra, Trigoso & Santa María, 2013):

$$N_a = 2N_e \quad (2.5)$$

Las pérdidas de potencia durante el funcionamiento del motor se tomaron en cuenta mediante la ecuación:

$$N_f = N_a f / e \quad (2.6)$$

Donde la potencia final (N_f) está determinada por la potencia de arranque (N_a) y un factor de fricción (f) dividido para la eficiencia (e) del motor.

2.5.2.2.2 Diámetro de eje del agitador

Se procedió a utilizar la ecuación para la determinación del eje por medio del método de distorsión de Von Mises, esta considera la propiedad del material a utilizar, además de los momentos de torsión y flexión presentes (Bolívar, 2013).

$$M_f = F * L \quad (2.7)$$

Donde el momento de flexión (M_f) este dado por la fuerza aplicada sobre el eje (F) y la longitud característica (L), mientras que el momento de torsión (M_t) está dado por la misma fuerza (F) y el radio de las paletas (r).

$$M_t = F * r \quad (2.8)$$

El diámetro del eje (d_e) se determinó con el factor de seguridad (n_f) sobre el esfuerzo de flexión del material (S_y), considerando el momento de flexión (M_f) y el momento de torsión (M_t) en la ecuación:

$$d_e = \left(\frac{16N}{\pi S_y} [4M_f^2 + 3M_t^2]^{1/2} \right)^{1/3} \quad (2.9)$$

Con este valor se aseguró que el agitador tenga resistencia frente al fluido, posterior a esto se seleccionó el motor tomando como referencia los valores de potencia previamente mencionados.

2.5.2.2.3 Selección del rodamiento

Mediante el uso del catálogo NTN, se determinó el rodamiento necesario para soportar la carga ejercida por el agitador al momento de su funcionamiento.

Se procedió a la obtención de la magnitud de reacción total (R_t) resultante de la carga radial (R_x) y axial (R_y).

$$R_t = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (2.10)$$

Además, se calculó la vida nominal ajustada que depende de los factores, a_1 , a_2 , a_3 siendo de confiabilidad, característica del rodamiento y condiciones de operación, respectivamente. Esto ayudó a una aproximación más real y acertada para nuestro diseño.

$$L_n = a_1 a_2 a_3 L_{10} \quad (2.11)$$

La vida de aplicación de máquinas (L_{10}) se lo obtuvo por medio de un tabla del catálogo de NTN, el cual especifica un rango de vida útil.

Clasificación del servicio	Aplicaciones en maquinarias y vida requerida (referencia) L_{10h} $\times 10^3$ h				
	~4	4~12	12~30	30~60	60~
Máquinas usadas por periodos cortos q utilizadas sólo ocasionalmente.	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones domésticas • Herramientas de mano eléctricas 	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinaria agrícola • Equipos de oficina 			
Utilización durante periodos cortos e intermitentemente, pero con requerimientos de alta confiabilidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipos médicos • Instrumentos de medición 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores de acondicionadores de aire residenciales • Equipos de construcc. • Elevadores • Grúas 	<ul style="list-style-type: none"> • Grúas (Poleas) 		
Máquinas que no se usan constantemente, pero se utilizan por periodos largos.	<ul style="list-style-type: none"> • Automóviles • Vehículos de dos ruedas 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores pequeños • Buses/camiones • Transmisiones de engranes en general • Máquinas madereras 	<ul style="list-style-type: none"> • Husillos de máquinas • Motores industriales de aire • Trituradores • Cribas vibratorias 	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisiones de engranes principales • Máquinas de caucho/plástico • Rodillos de calandrias • Máquinas de impresión 	
Máquinas en constante uso durante las 8 horas del día.		<ul style="list-style-type: none"> • Laminadores • Escaleras eléctricas • Transportadores • Centrifugas 	<ul style="list-style-type: none"> • Ejes de vehículos ferroviarios • Acondicionadores de aire • Motores grandes • Centrifugas 	<ul style="list-style-type: none"> • Ejes de locomotoras • Motores de tracción • Elevadores mineros • Volantes a presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Máquinas de fabricación de papel • Equipos de propulsión para barcos
24 horas de operación continua, no interrumpible.					<ul style="list-style-type: none"> • Equipos de abastecimiento de agua • Bombas de drenaje/ventiladores para minería • Equipos para generación de potencia

Figura 2.7 Tabla de aplicaciones en maquinaria y vida requerida según clasificación del servicio (New Technology Network Corporation, 2004)

Finalmente, se calculó la capacidad de carga (C_r) para la selección del rodamiento, en donde el coeficiente P cambia dependiendo del tipo de rodamiento que se seleccione, para este caso se eligió uno tipo bola, el cual tiene un valor P correspondiente a 3, se tomó en cuenta que en estos rodamientos se desprecian las fuerzas axiales, por lo que se asume que R_t equivale a la fuerza P_r que soportará el rodamiento.

$$C_r = \left(\frac{60NL_n}{10^6} \right)^{1/P} * P_r \quad (2.12)$$

Una vez obtenido la capacidad de carga, se seleccionó en el catálogo el rodamiento según el diámetro con el que trabajará.

2.5.2.3 Simulación del fluido en tanque

Para poder validar y observar el comportamiento del fluido interactuando con el agitador en el tanque, se utilizó el software ANSYS Fluent ®, en donde se realizó una simulación con los datos previamente calculados y establecidos como de entrada, además de otros valores de trabajo.

2.5.3 Dosificado

La principal característica a considerar fue la cantidad de pulpa necesaria con la que se logra obtener el espesor requerido para la elaboración del producto final. Se tomó como referencia que al momento de realizar el mezclado un 11% del papel se pierde por la tinta presente en el mismo (López, 2005). La relación que se determinó a dosificar es 87% agua y 13% papel, teniendo ya en consideración el 11% de pérdida establecido previamente.

Otra de las consideraciones fue el caudal requerido para el producto en proporción al espacio a llenar, es decir donde será vertida la pulpa. Para la determinación del caudal se fijó un volumen a llenar en un determinado tiempo, hasta poder obtener las dimensiones de una hoja A3, siendo la base para el volumen a dosificar y el tamaño de la banda donde será transportada la pulpa de papel.

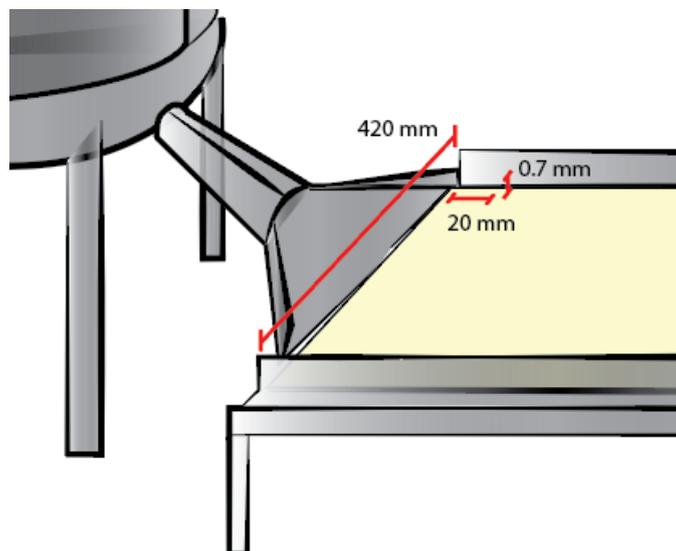


Figura 2.8 Medidas de referencia según formato A3. Fuente: Elaboración propia

Las medidas presentes en la Figura 2.8 fueron utilizadas para determinar el volumen necesario de fibra de papel, obteniendo así la cantidad requerida según los porcentajes de agua y papel.

Se utilizó la ecuación de caudal en caída libre para la determinación del área de descarga (A), este caudal depende de la gravedad (g), el cambio de altura (Δh) y el coeficiente de descarga (c).

$$Q = c\sqrt{2g\Delta h} (A) \quad (2.13)$$

El dosificado se realiza por medio de una resbaladera, debido a esto se consideró el ángulo de reposo del material al ser vertido, evitando así el estancamiento de material en el proceso (Paz, 2014).

2.5.4 Sistema de transmisión

Se consideró en este apartado lo que es el sistema de transmisión y la banda transportadora del material procesado. Estos son partes fundamentales de la línea de reciclado ya que forman parte del esqueleto y fuerza de la línea.

2.5.4.1 Selección de banda transportadora

Existen distintos tipos de bandas para el transporte de materia prima o productos, el factor más importante de la banda en una línea que contiene secado es la temperatura que resiste, por lo que la selección de la banda se relaciona de manera directa con la característica del secado.

Las bandas presentan diferentes características dependiendo del tipo de aplicación, en la industria papelera, el material de las bandas utilizadas se selecciona por su capacidad de absorber y remover agua de la pulpa para una mejor elaboración del producto final, estos son de fieltro y tela (Wolfgang & Hippolit, 2010).

Por otro lado, al momento de realizar la selección se tomó en consideración la tensión que soporta la banda durante la operación, ya que un lado debe estar más tenso, esto da equilibrio al momento de la rotación del tambor motriz con el movimiento de todos los rodillos y evita que la banda se deslice.

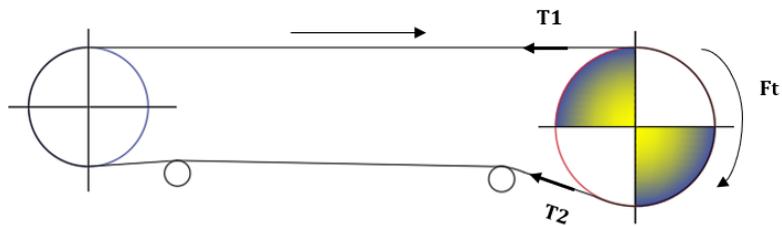


Figura 2.9 Representación de las tensiones (Habasit, 2012)

Las ecuaciones de las fuerzas tensoras para el tambor motriz se escriben de la siguiente manera:

$$T_{1A} = \frac{(F_{tA})e^{\mu_A\theta}}{e^{\mu_A\theta} - 1} \quad (2.14)$$

$$T_{2A} = \frac{F_{tA}}{e^{\mu_A\theta} - 1} \quad (2.15)$$

Donde la fuerza del lado más tenso (T_{1A}) y la fuerza del lado menos tenso es (T_{2A}), dependen de la fuerza tangencial de arranque del sistema (F_{tA}), multiplicada por Euler elevado por un coeficiente de fricción de arranque (μ_A) y un ángulo (θ) de trabajo de la banda en ese punto.

La fuerza tangencial de arranque F_{tA} se lo determinó por medio de la multiplicación de un factor de catalogo, con la fuerza tangencial (F_t), obteniendo:

$$F_{tA} = 1.6(F_t) \quad (2.16)$$

El coeficiente de fricción de arranque (μ_A) es igual al incremento de 0.05 del coeficiente de fricción (μ).

$$\mu_A = \mu + 0.05 \quad (2.17)$$

2.5.4.2 Diseño de elementos motrices

Los elementos principales para el movimiento de la banda en la línea se eligieron por medio de la metodología empleada previamente para el diseño de forma, esto dio como resultado que el sistema más eficiente es el piñón-engrane. El organismo que establece normas para engranes es la “American Gear Manufacturers Association” (AGMA), por esto los métodos y ecuaciones utilizados para el diseño se encuentran descritos en su Norma AGMA 2001-D04.

Para el diseño del sistema piñón-engrane se tomó en consideración la ley fundamental de los engranes, la misma indica que la relación de la velocidad angular entre los engranes (m_v) debe ser constante, teniendo en consecuencia la ecuación de la razón de la velocidad angular (Norton, 2009):

$$m_v = \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{r_{in}}{r_{out}} \quad (2.18)$$

Donde ω_{out} es la rapidez angular de salida, ω_{in} la rapidez angular de entrada. Esta relación también se expresa mediante el radio de entrada (r_{in}) y el de salida (r_{out}).

Los valores para el ángulo de presión de un engrane ya están estandarizados, los establecidos son 14.5° , 20° y 25° . No existe restricción al momento de tomar un ángulo de presión, pero se opta por los estandarizados debido a la relación de costo.

El módulo (m_g) se determinó a partir de la ecuación que relaciona el número de dientes presentes en el engrane (N_g) sobre el número de dientes del piñón (N_p).

$$m_g = \frac{N_g}{N_p} \quad (2.19)$$

Los engranes se deben analizar por dos tipos de esfuerzos:

- Esfuerzo de flexión
- Esfuerzo superficial

2.5.4.2.1 Esfuerzo de flexión de AGMA

AGMA estableció la ecuación del esfuerzo de flexión (σ_b) para valores en el sistema internacional, la misma está basada en los principios de la fórmula de Lewis, además de las suposiciones de Dolan y Broghammer.

$$\sigma_b = \frac{W_t}{A_c} \frac{K_a K_m}{m J} \frac{K_s K_B K_j}{K_v} \quad (2.20)$$

Para el cálculo de la fuerza tangencial (W_t) se seleccionó un ángulo de presión igual a 20° , dado esto se determinó la fuerza mediante la siguiente ecuación, en donde se tiene la fuerza ejercida por el peso (W_μ) sobre el coseno del ángulo de presión (α).

$$W_t = \frac{W_\mu}{\cos(\alpha)} \quad (2.21)$$

Se recomienda mantener el ancho de cara (A_c) en un rango de $\frac{8}{P_d} < A_c < \frac{16}{P_d}$. Sin embargo, para ser conservador al momento de diseñar se utilizó la siguiente ecuación donde este depende del paso diametral (P_d).

$$A_c = \frac{12}{P_d} \quad (2.22)$$

El factor geométrico de Lewis (J) presenta una relación entre los dientes del piñón y los del engrane, la siguiente tabla contiene los valores estándares determinados por AGMA para el factor.

Dientes en el engrane	Dientes en el piñón																
	12		14		17		21		26		35		55		135		
	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	
12	U	U															
14	U	U	U	U													
17	U	U	U	U	U	U											
21	U	U	U	U	U	U	0.24	0.24									
26	U	U	U	U	U	U	0.24	0.25	0.25	0.25							
35	U	U	U	U	U	U	0.24	0.26	0.25	0.26	0.26	0.26					
55	U	U	U	U	U	U	0.24	0.28	0.25	0.28	0.26	0.28	0.28	0.28			
135	U	U	U	U	U	U	0.24	0.29	0.25	0.29	0.26	0.29	0.28	0.29	0.29	0.29	

Figura 2.10 Tabla de relación entre dientes para determinación de factor geométrico de Lewis (Norton, 2009)

El factor K_a representa la relación de la máquina impulsada con la máquina impulsadora, esto proviene del tipo de impacto que tendrían cada una de las partes interesadas.

Máquina impulsora	Máquina impulsada		
	Uniforme	Impacto moderado	Impacto fuerte
Uniforme (motor eléctrico, turbina)	1.00	1.25	1.75 o mayor
Impacto suave (motor de varios cilindros)	1.25	1.50	2.00 o mayor
Impacto medio (motor de un solo cilindro)	1.50	1.75	2.25 o mayor

Figura 2.11 Tabla de valores para factor K_a (Norton, 2009)

K_m es el factor de distribución de carga, este depende del ancho de cara como indica AGMA.

Ancho de cara in (mm)	K_m
<2 (50)	1.6
6 (150)	1.7
9 (250)	1.8
≥20 (500)	2.0

Figura 2.12 Tabla de valores para factor K_m (Norton, 2009)

El factor dinámico (K_v) se lo determinó por medio de la gráfica presente en la Figura 2.14, la cual depende de la velocidad en la línea de paso y el índice de calidad (Q_v).

Velocidad de paso	Q_v
0–800 fpm	6–8
800–2000 fpm	8–10
2000–4000 fpm	10–12
Más de 4000 fpm	12–14

Figura 2.13 Tabla de valores para el índice de calidad (Norton, 2009)

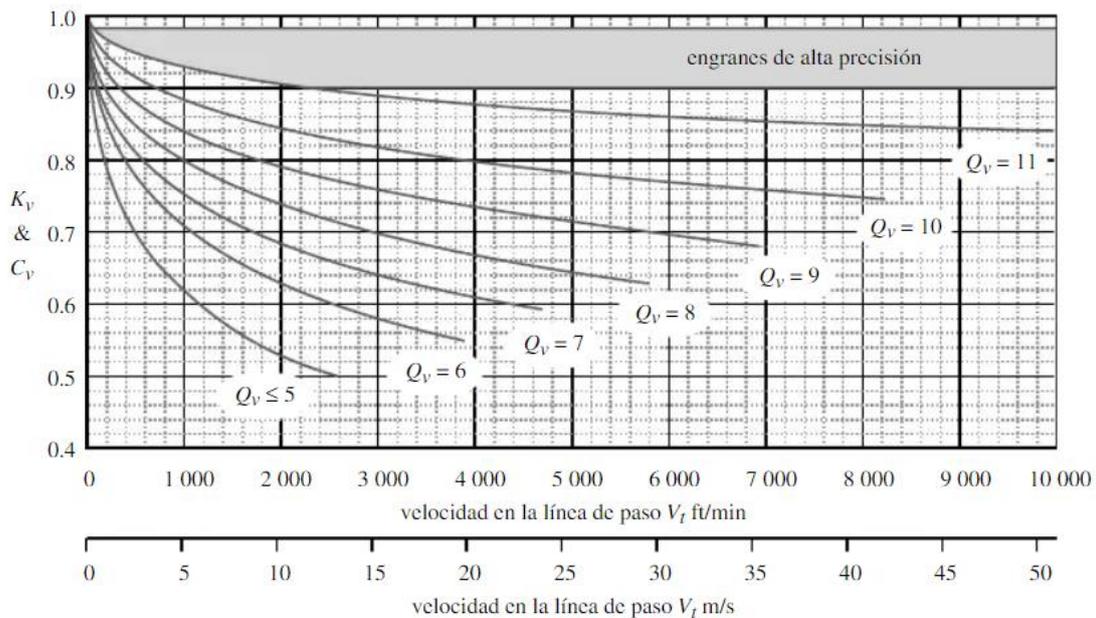


Figura 2.14 Gráfica relación velocidad en la línea de paso – índice de calidad y factor K_v (Norton, 2009)

Los últimos factores K_s , K_B , K_j correspondiente a tamaño, espesor del aro y engrane loco, respectivamente. Presentan ciertas recomendaciones según AGMA, para K_s y K_B se espera un valor igual a 1. Finalmente, K_j cambia dependiendo de la presencia de lo denominado engrane loco, dado que este no es el caso el factor es igual a 1.

La resistencia a la fatiga por flexión (S_{fb}) se debe corregir mediante factores que toman en consideración la variante debido a que es un valor determinado de manera experimental por AGMA.

$$S_{fb} = \frac{K_L}{K_T K_R} S_{sf'} \quad (2.23)$$

El factor de vida K_L revisa la cantidad de ciclos de carga para la máquina en relación con la dureza del material.

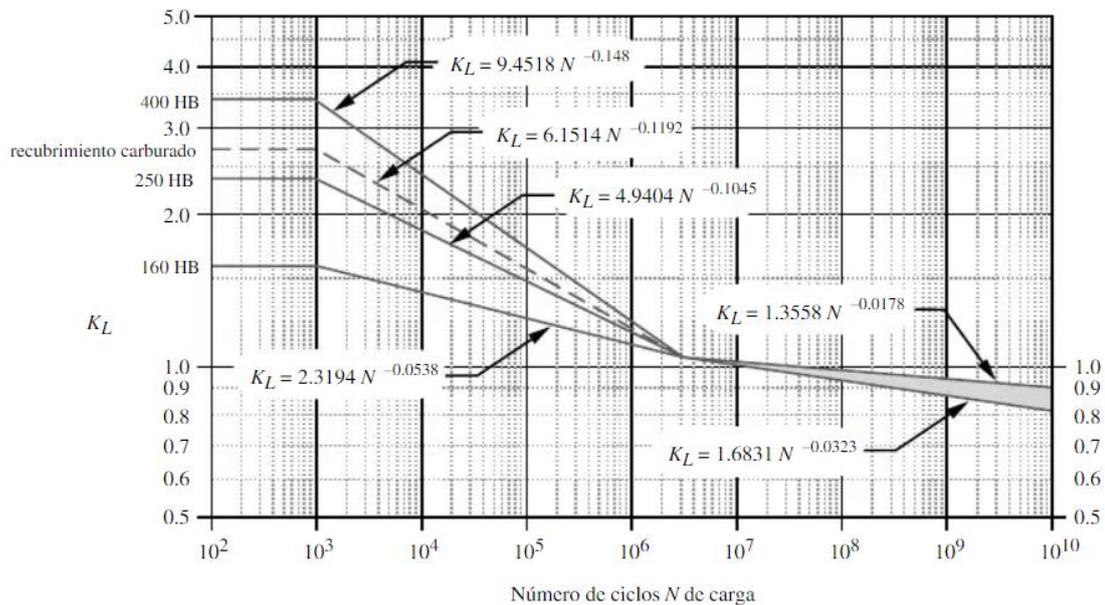


Figura 2.15 Gráfica número de ciclos de carga - Factor K_L y dureza del material (Norton, 2009)

El factor de temperatura K_T corrige dependiendo a la temperatura que se opere, al trabajar a una temperatura menor a 250 °F presentó un valor de 1.

La confiabilidad dada por el factor K_R se seleccionó en base al porcentaje de seguridad que se espera del diseño.

% de confiabilidad	K_R
90	0.85
99	1.00
99.9	1.25
99.99	1.50

Figura 2.16 Tabla de valores para factor K_R según confiabilidad del diseño (Norton, 2009)

La resistencia a la fatiga teórica por flexión (S_{sf}), se obtuvo según el material a utilizar.

Material	Clase AGMA	Designación del material	Tratamiento térmico	Dureza superficial mínima	Resistencia a la fatiga por tensión				
					psi x 10 ³	MPa			
Acero	A1-A5		Endurecido totalmente	≤ 180 HB	25-33	170-230			
			Endurecido totalmente	240 HB	31-41	210-280			
			Endurecido totalmente	300 HB	36-47	250-325			
			Endurecido totalmente	360 HB	40-52	280-360			
			Endurecido totalmente	400 HB	42-56	290-390			
			Endurecido por llama o por inducción	Patrón tipo A 50-54 HRC	45-55	310-380			
			Endurecido por llama o por inducción	Patrón tipo B	22	150			
			Carburado y recubrimiento endurecido	55-64 HRC	55-75	380-520			
			AISI 4140 Nitruado	84.6 HR15N [†]	34-45	230-310			
			AISI 4340 Nitruado	83.5 HR15N	36-47	250-325			
Hierro colado	20, 30, 40	Clase 20, Clase 30, Clase 40	Como está fundido		5	35			
			Como está fundido	175 HB	8	69			
			Como está fundido	200 HB	13	90			
			Hierro nodular (dúctil)	A-7-a, A-7-c, A-7-d, A-7-e	60-40-18, 80-55-06, 100-70-03, 120-90-02	Recocido	140 HB	22-33	150-230
						Templado y revenido	180 HB	22-33	150-230
						Templado y revenido	230 HB	27-40	180-280
Hierro maleable (perlítico)	A-8-c, A-8-e, A-8-f, A-8-i	45007, 50005, 53007, 80002		165 HB	10	70			
				180 HB	13	90			
				195 HB	16	110			
				240 HB	21	145			
Bronce	Bronce 2, Al/Br 3	AGMA 2C, ASTM B-148 78 aleación 954	Fundido en arena	40 ksi resistencia a la tensión mín.	5.7	40			
			Tratado térmicamente	90 ksi resistencia a la tensión mín.	23.6	160			

Figura 2.17 Tabla de propiedades de los materiales a considerar (Norton, 2009)

Se comprobó que el engrane no llegará a fallar por flexión mediante el factor de seguridad (n_b) que se determina con la relación de la

resistencia a la fatiga (s_{fb}) y el esfuerzo de la flexión (σ_b) del elemento a analizar.

$$n_b = \frac{s_{fb}}{\sigma_b} \quad (2.24)$$

2.5.4.2.2 Esfuerzo superficial de AGMA

$$\sigma_c = C_p \sqrt{\frac{W_t}{A_c I d} \frac{C_a C_m}{C_v} C_s C_f} \quad (2.25)$$

En la presente ecuación se utilizó información previamente mencionada. La fuerza tangencial (W_t) es la misma fuerza utilizada para el análisis de flexión, al igual que el factor A_c . Los factores correctivos C_a , C_m , C_v , C_s y C_f también se determinan a partir de los gráficos y tablas de la sección anterior.

El factor geométrico superficial (I) también conocido como factor de resistencia a la picadura se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$I = \frac{\cos \alpha}{\left(\frac{1}{P_p} \pm \frac{1}{P_g}\right) d_p} \quad (2.26)$$

$$P_p = \sqrt{\left(r_p + \frac{1}{P_d}\right) - (r_p * \cos \alpha) - \frac{\pi}{P_d} \cos \alpha} \quad (2.27)$$

$$P_g = C * \cos \alpha \mp P_p \quad (2.28)$$

Donde las ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28 presentan variables como el radio de paso del piñón (r_p), el radio de curvatura de los dientes del piñón (P_p) y el radio de curvatura de los dientes del engrane (P_g).

El coeficiente elástico C_p según AGMA se obtiene a partir del material.

Material del piñón	E _p psi (MPa)	Material del engrane					
		Acero	Hierro maleable	Hierro nodular	Hierro fundido	Bronce al aluminio	Bronce al estaño
Acero	30E6 (2E5)	2 300 (191)	2 180 (181)	2 160 (179)	2 100 (174)	1 950 (162)	1 900 (158)
Hierro maleable	25E6 (1.7E5)	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	24E6 (1.7E5)	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	22E6 (1.5E5)	2 100 (174)	2 020 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	17.5E6 (1.2E5)	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bronce al estaño	16E6 (1.1E5)	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

Figura 2.18 Tabla de valores del coeficiente elástico (Norton, 2009)

La resistencia a la fatiga superficial corregida se obtuvo aplicando factores de corrección dados por AGMA en la siguiente ecuación.

$$S_{fc} = \frac{C_L C_H}{C_T C_R} S_{fc'} \quad (2.29)$$

Los factores de corrección C_H, C_T según el presente caso toman el valor de 1, por otro lado para los factores C_L, C_R se hizo uso de la Figura 2.15 sobre la vida y Figura 2.16 para confiabilidad.

Finalmente, se determinó el factor de seguridad para el esfuerzo superficial (n_c), mediante la relación de la resistencia a la fatiga (S_{fc}) con el esfuerzo superficial (σ_c) del elemento a analizar.

$$n_c = \frac{S_{fc}}{\sigma_c} \quad (2.30)$$

2.5.4.3 Potencia del sistema de transmisión

Para el cálculo de potencia se tomó en consideración el avance de banda para la línea, el cual se determinó a partir del dosificado, dando un valor de 2 cm/s de velocidad (v), con esto y la fuerza tangencial necesaria (W_t) para

el movimiento de la materia prima se obtuvo la potencia (P) con la que se seleccionó el motor requerido.

$$P = W_t(v) \quad (2.31)$$

2.5.5 Bancada

Para la base del sistema se determinó el material a emplear en la estructura, en donde se consideró la resistencia, costo y facilidad de adquisición en el país. Se realizó una simulación y análisis de esta para la comprobación de la bancada, en donde se observó su desempeño, valores de deformación, esfuerzos y factor de seguridad fueron los resultados de simulación en el software ANSYS®.

2.5.6 Prensado y Secado

2.5.6.1 Prensado

Para disminuir la humedad de la pasta y controlar el espesor antes de entrar al secado se posicionaron rodillos prensadores, estos se colocan uno sobre el otro dejando un espacio para el paso de la pulpa, para esto se consideró el espesor de la banda y del cartón, cabe recalcar que el comportamiento de la pasta durante el prensado se relaciona con el material de la banda, ya que estas absorben grandes cantidades de agua. Esta sección extrae entre 50-55% de la humedad en la pasta (Da Silva Campos, 2009), sin embargo, en la fase final parte del agua que se absorbe por la banda regresa al cartón, por lo tanto, se procedió a establecer el inicio del área de secado directo a la salida del prensado acortando así el tiempo de este traspaso.

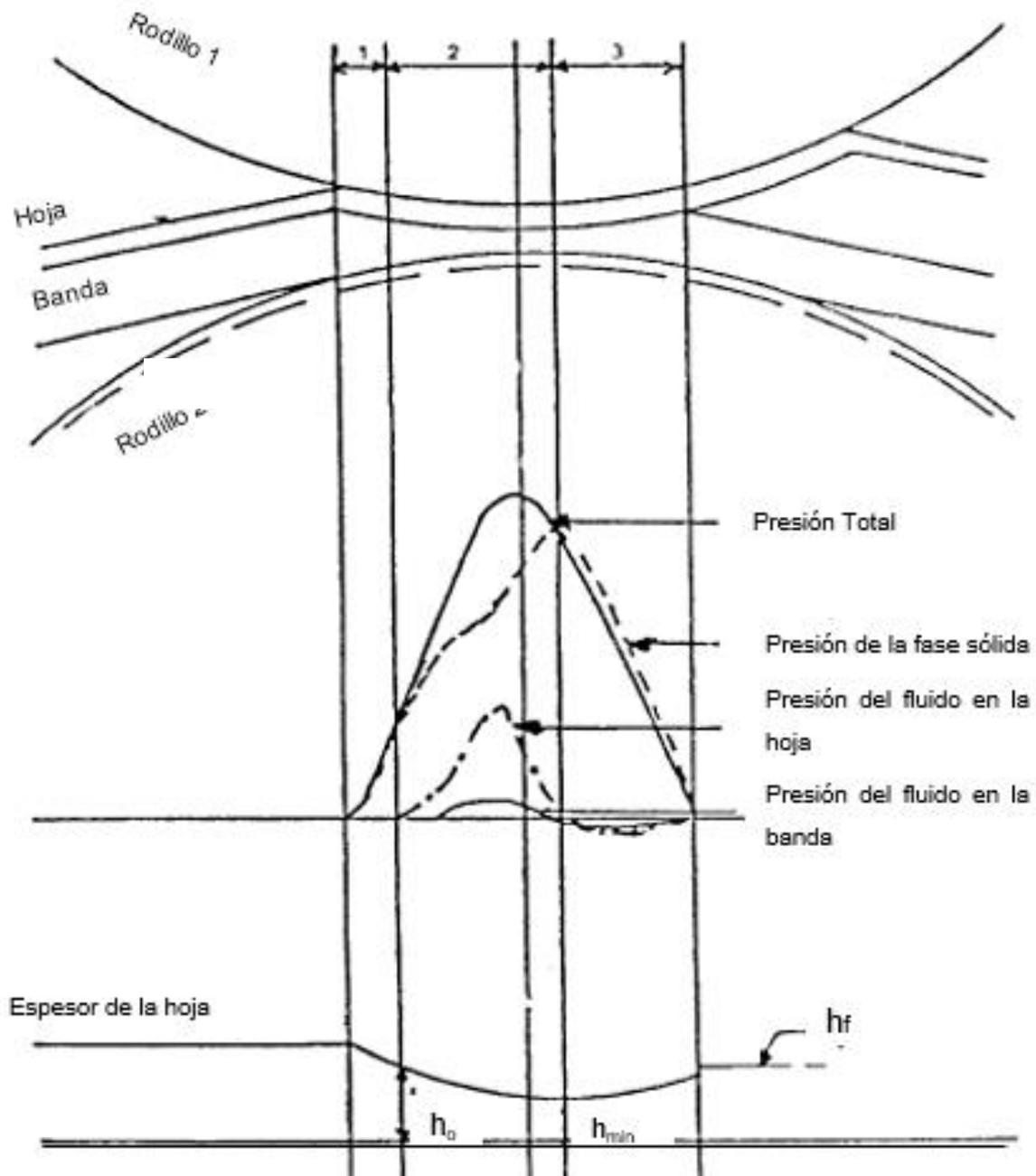


Figura 2.19 Comportamiento de la pasta durante la fase de prensado (Da Silva Campos, 2009)

El prensado se puede dividir en 4 fases. Para la primera la banda y la pulpa ingresan a la zona de contacto con los rodillos, conforme se avanza hacia el punto más estrecho la presión ejercida es mayor, en estos puntos se establece que el aire se elimina de manera gradual. En la segunda fase ya toma forma el cartón con saturación alta, esto implica una presión hidráulica que resulta en el traspaso del agua en el cartón a la banda. Finalmente en

la última sección de contacto el cartón se descomprime debido a que cierta cantidad de aire y agua se introduce en él. (Da Silva Campos, 2009)

2.5.6.2 Secado

En la sección de secado se implementaron métodos de transferencia de calor y masa para poder obtener un tiempo de precalentamiento de la cámara y el tiempo que debe permanecer adentro la pulpa para salir a un rango de humedad entre 10%-15%.

Para el precalentado de la cámara se hizo uso de ecuaciones de transferencia de calor por convección forzada. En este caso el aire se encuentra a una temperatura de 90°C siendo insuflado a una velocidad de 4 m/s, teniendo establecidas estas condiciones se pudo determinar el número de Reynolds por medio de la ecuación 2.3, Además, cabe recalcar que las propiedades termofísicas del aire a una temperatura promedio encontrada entre la temperatura del medio y la de trabajo vienen dadas por tabla (Incropera & DeWitt, 1999).

Tabla 2.22 Propiedades termofísicas del aire (Incropera & DeWitt, 1999)

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
300	1.3947	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690

Se procedió a determinar el Nusselt (Nu) en el sistema de convección forzada, para esto se recomienda el método de Churchill y Bernstein que utiliza los valores a las mismas condiciones con las que se evaluó el número de Reynolds (Re) y el número de Prandtl (Pr) (Incropera & DeWitt, 1999).

$$Nu_l = 0.3 + \frac{0.62Re_l^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + (0.4/Pr)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{Re_l}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (2.32)$$

Por medio de Nusselt se logró determinar el coeficiente de convección del sistema a las condiciones iniciales previamente descritas.

$$Nu_l = \frac{hL}{k} \quad (2.33)$$

$$h = \frac{Nu_D k}{L} \quad (2.34)$$

Donde el coeficiente de convección (h) se determina mediante el número de Nusselt por el coeficiente de conducción (k) sobre la distancia característica (L).

Para determinar el tiempo total de secado se utilizaron curvas de secado, estas representan los periodos de tiempo que necesita un sólido con presencia de humedad para empezar a perderla, donde la pendiente expresa la velocidad de secado que tendrá el material. Las curvas de secado se obtienen de forma experimental a condiciones controladas (Ocon & Tojo, 1967).

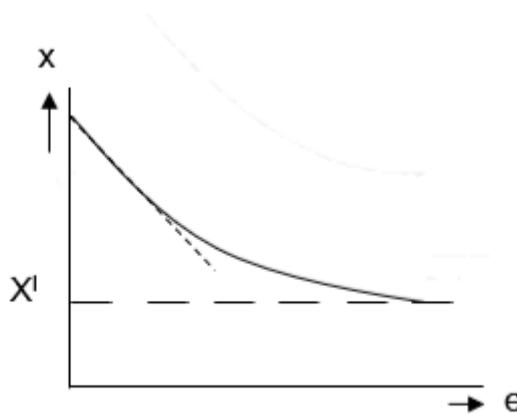


Figura 2.20 Representación de curvas de secado. Fuente: Elaboración propia

Con la curva de secado se pudo determinar el tiempo para una área específica, sabiendo el peso final del sólido seco y la velocidad de secado determinada a partir de la curva (Ocon & Tojo, 1967).

$$\theta_a = \frac{S}{T} \int_{x_0}^{x_i} \frac{dX}{V_s} \quad (2.35)$$

El tiempo de secado (θ_a) se logró definir a partir del área del material a secar (T) necesaria para que el producto salga a la humedad requerida, el peso del producto seco (S), la variación entre 2 puntos de humedad (x) y la velocidad de secado (V_s), con esto se realizó un arreglo de cilindros para administrar el espacio de la cámara, logrando así un óptimo secado en un menor espacio.

Por otro lado, para obtener la cantidad de calor necesaria en la cámara de secado se calculó el calor sensible, calor latente y finalmente las pérdidas por transferencia.

El calor sensible se determinó tanto para la pulpa de papel como para el aire mediante la siguiente ecuación.

$$Q_s = mC_p(T_F - T_I) \quad (2.36)$$

Donde (Q_s) representa el calor sensible del sistema, este depende de la masa del fluido que se calienta (m), el calor específico (C_p) del mismo y la variación de temperatura.

El calor latente depende de la humedad que presente la pulpa, dado que se obtuvo el calor necesario para la remoción de la cantidad de humedad requerida en el sistema.

$$Q_L = m_p h_v (H_i - H_f) \quad (2.37)$$

Donde (Q_L) representa el calor latente, la masa de la pulpa (m_p) es multiplicada por la entalpia de vaporización del agua (h_v) y la variación de

la humedad, siendo la humedad inicial (H_i) y la humedad a la cual se tiene que llegar (H_f).

Finalmente, se obtuvo el calor necesario calculando las pérdidas que tendrá el sistema por medio de transferencia de calor, considerando un flujo desde la zona interna a la zona externa. Primero se realizó una analogía entre la resistencia del flujo de calor y una resistencia eléctrica, obteniendo con esto una suma de resistencias compuesta de resistencias convectivas y conductivas, además, se consideró la resistencia de contacto, esta se presenta entre elementos sólidos que a su vez tienen resistencias de conducción.

Para la resistencia de conducción (R_{cond}) se utilizó la ecuación presentada a continuación que relaciona el espesor (L) en la que se realizará la transferencia, el área transversal (A) y el coeficiente de conducción (k).

$$R_{cond} = \frac{L}{Ak} \quad (2.38)$$

La resistencia de convección (R_{conv}) se determinó por medio de la unidad dividida para el área transversal (A) y el coeficiente de convección (h).

$$R_{conv} = \frac{1}{Ah} \quad (2.39)$$

La resistencia de contacto se consideró como una de convección, esta se encuentra entre el material de aislamiento y el metal de la estructura, siendo una convección natural, para obtener el valor se deben utilizar las siguientes ecuaciones:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\gamma^2} \quad (2.40)$$

Donde el número de Grashof (Gr) depende de la gravedad (g), el coeficiente de expansión térmica (β), la variación de temperatura en el medio y la distancia característica (L_c) dividida para la viscosidad cinemática (γ) al cuadrado.

El número de Nusselt (Nu) es un valor adimensional, la siguiente ecuación será tomada del caso para pared vertical.

$$Nu = 0.59 Ra_L^{1/4} \quad (2.41)$$

Donde el número de Nusselt (Nu) depende del número de Rayleigh Ra , el mismo se obtiene mediante la multiplicación del número de Grashof (Gr) por el número de Prandtl (Pr).

$$Ra = Gr(Pr) \quad (2.42)$$

De la ecuación primitiva del número de Nusselt se determinó el coeficiente de convección que se utiliza en la resistencia de contacto.

$$h = \frac{Nuk}{L} \quad (2.43)$$

Donde h es el coeficiente de convección, k el coeficiente de conducción k y L la longitud característica.

Finalmente, se calculó la cantidad de calor que se tuvo como pérdida en el sistema de la cámara de secado.

$$q' = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (2.44)$$

Donde el calor total de pérdidas (q') es equivalente a la diferencia de temperatura dividida para la resistencia total del sistema analizado.

2.5.7 Cortado

2.5.7.1 Determinación de la fuerza necesaria para el corte

Con el fin de evitar un corte parcial o la disminución de calidad a la cara del producto a cortar, se procedió a utilizar las características de un corte realizado a 100 hojas de papel para la aproximación de la fuerza necesaria para cortar un cartón equivalente a 10 veces el espesor de una hoja A4.

Tabla 2.23 Características del papel en prueba experimental (Arévalo, 2010)

Características del papel	
Resistencia al corte (100 hojas)	$32250 \frac{N}{m^2}$
Espesor (1 hoja)	0.07 mm
Peso (1 hoja)	4.68×10^{-3} kg

Con estos valores y por medio de la esfuerzo cortante (τ) se realizó una aproximación de la fuerza de corte (F_c) necesaria para ejecutar un corte en un cartón de tamaño A3 con un espesor de 0.7 mm y área transversal o de corte (A_u) igual a 2.94×10^{-4} m².

$$\tau = \frac{F_c}{A_u} \quad (2.45)$$

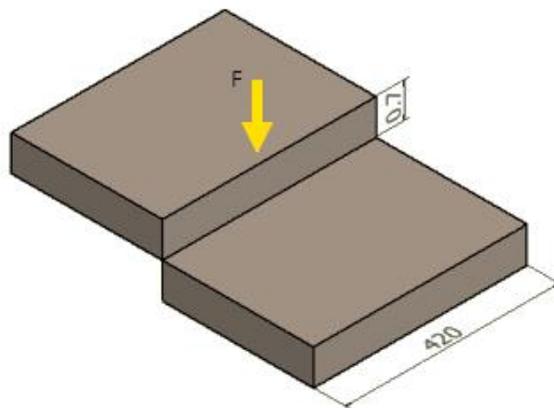


Figura 2.21 Representación del corte a realizar. Fuente: Elaboración propia

2.5.7.2 Selección de Cuchilla

Se determinó la cuchilla a utilizar considerando la fuerza mínima necesaria para realizar el corte. Dado el espesor del cartón las cuchillas presentes en cizallas manuales fueron consideradas, ya que su capacidad de corte máxima generalmente es de 40 hojas en adelante, por ende cumplen con la resistencia necesaria para cortar un cartón equivalente a la resistencia de 10 hojas papel bond, sin embargo, se obtuvo una selección más precisa y un mecanismo de guillotina eficiente al considerar el material a cortar como variable de importancia en la determinación del bisel adecuado para la cuchilla. Por otro lado, se especificó que el tamaño de la cuchilla debía ser el necesario para realizar un corte transversal a un cartón de 420 mm de ancho, es decir se estableció una restricción de longitud.

Se relacionaron las características del material con las de diferentes cartones normalizados y así seleccionar un ángulo ideal recomendado para bisel de la cuchilla.

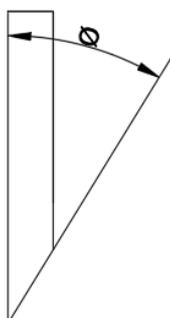


Figura 2.22 Referencia de ángulo para bisel presentado en la Tabla 2.24.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.24 Ángulos de bisel recomendados en cuchillas guillotinas (FASSCO,2017)

Material	Bisel (α)
Cartón Afiltrado	22°
Cartón de Fibra	24°
Cartón Gris	22°
Cartón Piedra	25°
Cartón de Manila	24°
Cartulina	22°

2.5.7.3 Selección de cilindro neumático

Se identificó el cilindro neumático necesario para aplicar presión en el corte y levantar la cuchilla a su posición de descanso, cada cilindro cuenta con características que dependen de su fabricación, desde presiones de trabajo hasta carreras establecidas, por lo que es recomendable basar la decisión en estos valores, de igual manera para guiar la selección se tomó como referencia las fuerzas necesarias mínimas, entre estas se encuentran la fuerza de corte para el avance y el peso de la cuchilla en el retroceso.

Un cilindro neumático tiene una fuerza teórica ($F_{Teórica}$) que proporciona mediante el émbolo. Se aproximó la fuerza necesaria a recibir por el cilindro con la fuerza teórica durante el avance (F_{avance}) o el retroceso ($F_{retroceso}$), dado esto se logró determinar el diámetro del émbolo (D) utilizando la presión del aire (P_{aire}) y el diámetro del vástago (d) en las siguientes ecuaciones (Arévalo, 2010).

$$F_{avance} = P_{aire} * \frac{\pi * D^2}{40} \quad (2.46)$$

$$F_{retroceso} = P_{aire} * \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{40} \quad (2.47)$$

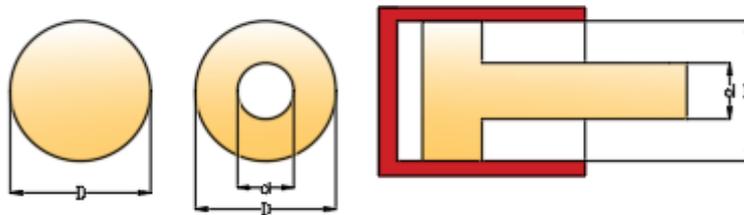


Figura 2.23 Representación de diámetros del cilindro neumático. Fuente: Elaboración propia

2.5.7.3.1 Diámetros en el cilindro neumático

Para la determinación del diámetro del cilindro se consideró que el peso de la cuchilla era mayor a la fuerza necesaria para el corte, por lo que la fuerza teórica de retroceso del cilindro neumático sería mayor que en el avance, es decir, para la selección del cilindro se calculó el valor aproximado del diámetro del émbolo desde la ecuación 2.47 al evaluar el peso de la cuchilla como fuerza teórica y el diámetro del vástago con un valor cercano o mayor al espesor de la cuchilla para empezar la iteración. En otras palabras, se aproximó un valor de diámetro para posteriormente compararlo con los que se encuentran en el mercado, una vez seleccionado el más próximo, se realizó una comprobación al utilizar los datos de catálogo para determinar la fuerza teórica, la misma que fue mayor a la mínima necesaria. No obstante, la fuerza teórica no es la real que proporciona el cilindro neumático debido a rozamientos presentes durante su funcionamiento, para tener un valor más aproximado se tomó un 10% de la fuerza teórica como valor de rozamiento para el cálculo de la fuerza real (Festo, 2016).

$$F_{\text{Real}} = F_{\text{Teórica}} - 0.1 * F_{\text{Teórica}} \quad (2.48)$$

Como método de confirmación para la selección del cilindro, se procedió a verificar el diámetro del émbolo mínimo para la presión y la fuerza real del cilindro mediante la gráfica presente en la Figura 2.24.

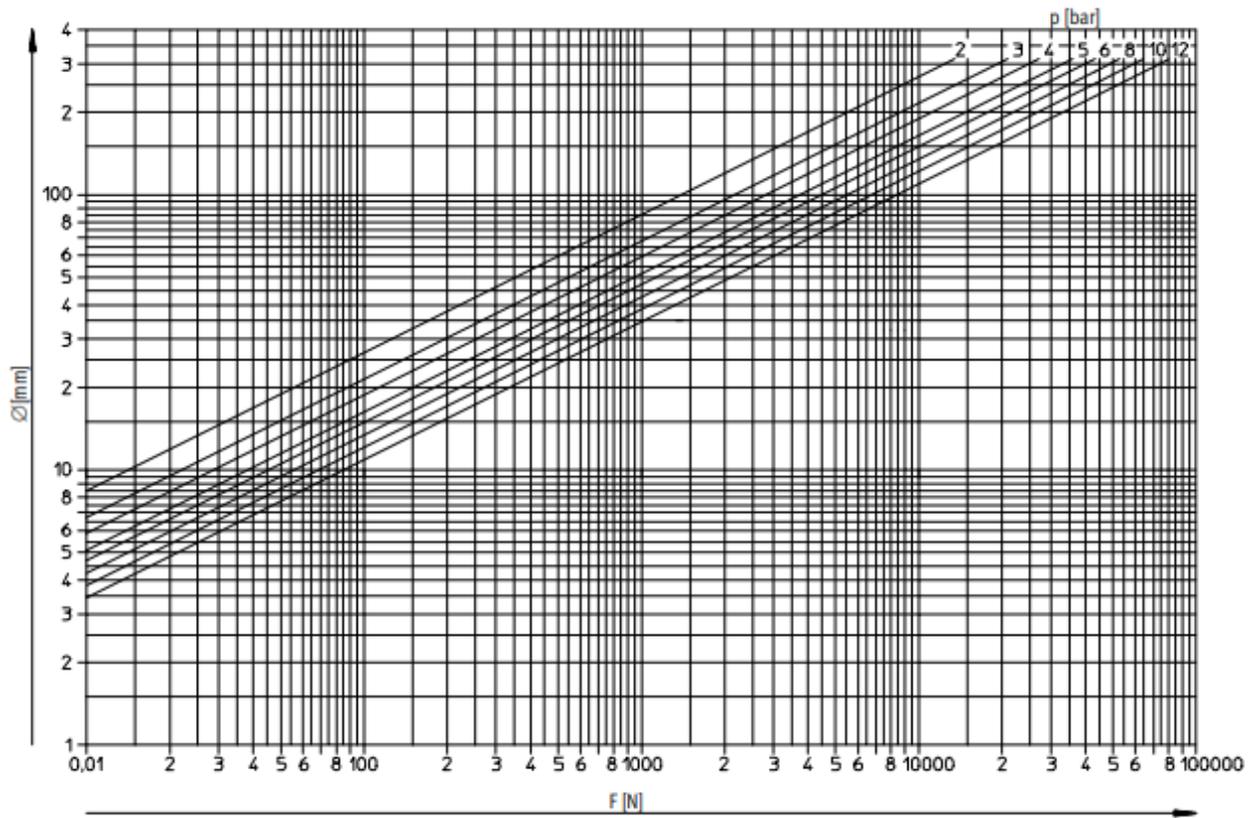


Figura 2.24 Diagrama de Presión en función de Fuerza y diámetro de émbolo (Festo, 2016)

2.5.7.4 Selección de compresor

Para determinar el compresor que funciona con el cilindro neumático, se procedió a calcular el consumo de aire por minuto Q_a .

$$Q_a = 2 * n * l * q \tag{2.49}$$

En donde n es el número de ciclos por minuto, l es la carrera del cilindro y q el consumo específico del aire que se obtiene a partir del diagrama presente en la Figura 2.25.

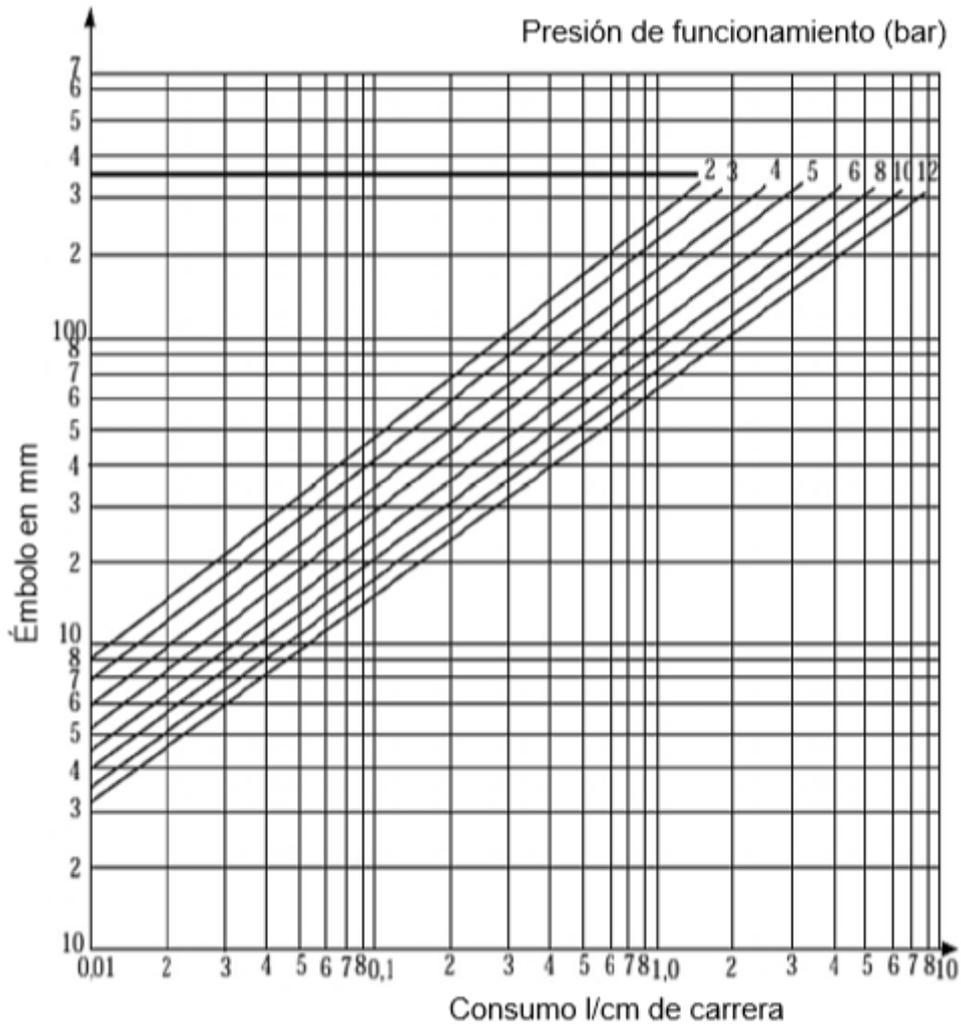


Figura 2.25 Diagrama de presión en función del consumo y diámetro de émbolo
(Arévalo, 2010)

Con el resultado de consumo se determinó mediante la ecuación 2.50 la potencia mínima necesaria (N) para seleccionar un compresor que tenga la capacidad para el funcionamiento del cilindro y la realización del trabajo (Arévalo, 2010).

$$N = P_{aire} * Q \quad (2.50)$$

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Trituradora

Se seleccionó una trituradora en base a las normas DIN 32757-1 / DIN 66399, la misma cumple con los parámetros establecidos en la Tabla 2.19, cabe recalcar que se obtuvo una mejor selección con referencia al costo al considerar un proveedor nacional.

Tabla 3.1 Especificaciones de la trituradora (Innovaciones Tecnológicas, 2018)

Código de Producto	HSM 1823 – B32	
Origen del Producto	Alemania	
Nivel de seguridad	4 – P4 T4	
Tipo de Corte	Partícula	
Tamaño de Corte	4.5mm x 3mm	
Max, de hojas por pasada	16 hojas	
Max de hojas trituradas por día	3000	
Tamaño	Ancho 370 mm x fondo 280 mm x Alto 200 mm	

3.2 Tanque

Se obtuvieron las dimensiones generales del tanque mediante el cálculo del volumen a almacenar. Dado el resultado de las encuestas, la cantidad de papel a reciclar es de 40000 hojas, lo que equivale al uso según la relación de la pasta previamente especificada en el Capítulo 2 de 3.76 m³ de agua mensualmente.

Dada la demanda, se determinó implementar una distribución para el procesamiento diario del papel considerando el diseño del 200% de capacidad. Se tuvo un volumen total diario de 0.400 m³ para consumo. Se estableció una altura de 1 m para el tanque tomando como criterio la facilidad de acceso y obteniendo una altura considerable para aplicar dosificación por gravedad, con esto se obtuvo un diámetro de 0.71 m.

Con las dimensiones del tanque se lograron obtener las medidas del agitador por medio de las relaciones previamente establecidas.

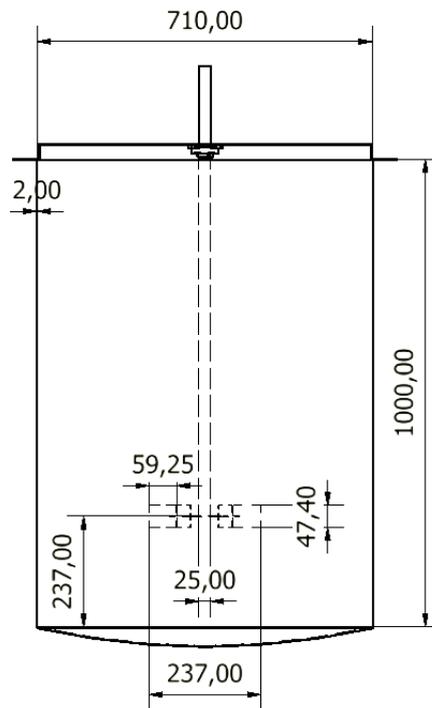


Figura 3.1 Dimensiones del tanque y el agitador. Fuente: Elaboración propia

Las medidas del tanque se sustentan con el cumplimiento de la norma API 650, por lo tanto, se seleccionó el acero AISI 304, un material anticorrosivo que sirvió de base para la determinación del espesor de la plancha de acero considerando las propiedades mecánicas del material, estableciendo un espesor de 2 mm.

3.3 Agitador

Una vez obtenidas las dimensiones, se determinó una velocidad nominal de 280 r.p.m. con los que se calculó la potencia, logrando así una referencia sobre lo necesario para mover el fluido dentro del tanque.

Tabla 3.2 Valores calculados para el diseño del agitador y la potencia requerida.

Fuente: Elaboración propia

Reynolds	1.08x10 ⁴
Factor N_p	5
Potencia estacionaria	234.59 W
Potencia de arranque	469.19 W
Potencia real	573.46 W

Se calculó el diámetro del eje para el agitador por medio de la ecuación de Von Mises obteniendo un valor de 25 mm, esto se comprobó por medio de una simulación dinámica en el software Autodesk Inventor®, dando como resultado lo observado en la Figura 3.3. Al analizar los valores se determinó que el diámetro es correcto.

Se seleccionó un rodamiento con chumacera tipo de pared, por medio del catálogo de NTN, obteniendo el rodamiento NTN-6805 con soporte autolineante de pared SNR-UCF205.

25	32	4	0.2	—	1.10	0.840	112	86	15.8	4 000	4 600	—	—	6705	—	LLF	—	—
	37	7	0.3	0.3	4.30	2.95	435	300	16.1	18 000	21 000	—	10 000	6805	ZZ	LLB	—	LLU
	42	9	0.3	0.3	7.05	4.55	715	460	15.4	16 000	19 000	—	9 800	6905	ZZ	LLB	—	LLU
	47	8	0.3	—	8.35	5.10	855	520	15.1	15 000	18 000	—	—	16005	—	—	—	—
	47	12	0.6	0.5	10.1	5.85	1 030	595	14.5	15 000	18 000	11 000	9 400	6005	ZZ	LLB	LLH	LLU
	52	15	1	0.5	14.0	7.85	1 430	800	13.9	13 000	15 000	11 000	8 900	6205	ZZ	LLB	LLH	LLU
	62	17	1.1	0.5	21.2	10.9	2 160	1 110	12.6	12 000	14 000	9 700	8 100	6305	ZZ	LLB	LLH	LLU
	80	21	1.5	—	34.5	17.5	3 550	1 780	11.6	10 000	12 000	—	—	6405	—	—	—	—

Figura 3.2 Especificaciones y características del rodamiento NTN-6805

(New Technology Network Corporation, 2004)

Por otro lado, la simulación de frecuencia modal del agitador por medio de Inventor dio como resultado una frecuencia de 13.82 Hz, lo cual indica que en ese momento el agitador entra en resonancia. Al trabajar en esas condiciones el agitador alcanza una velocidad crítica de 829.2 r.p.m. para la que se obtuvo un desplazamiento máximo de 51.83 mm. Esto comprobó que una velocidad de trabajo igual a 280 r.p.m. se encuentra dentro del rango aceptable.

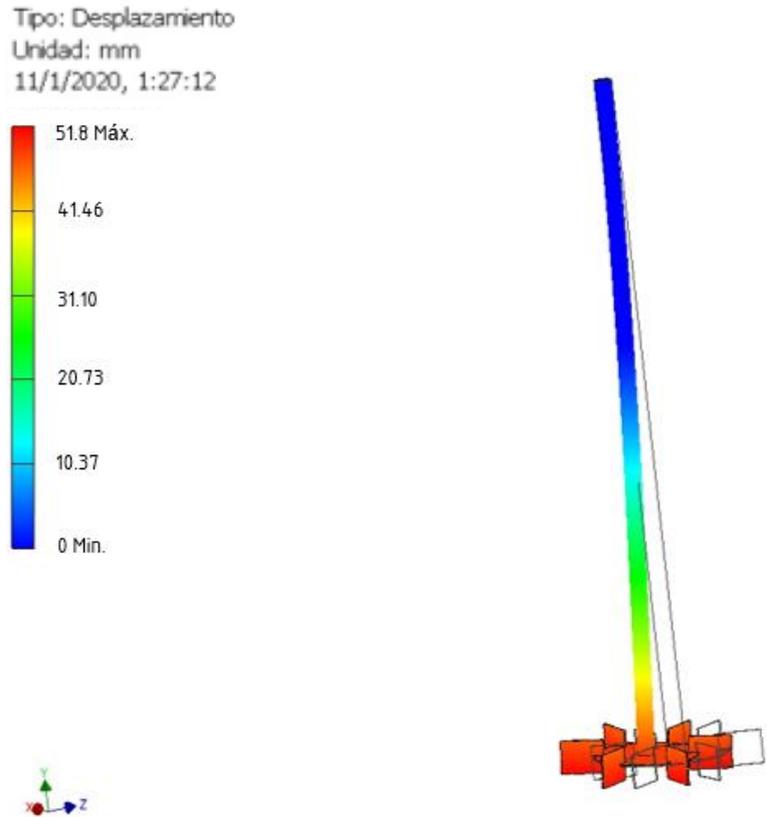


Figura 3.3 Resultado de simulación modal del agitador en Software Autodesk Inventor.

Fuente: Elaboración propia

Se simuló el comportamiento del fluido por medio del software ANSYS®, con esto se comprobó la conducta del fluido frente a un tipo determinado de agitador, se observó que el fluido tiene una circulación cíclica hasta una altura aproximada de 75% del nivel máximo del tanque, lo que determinó que no se desborda y se realiza un mezclado uniforme.

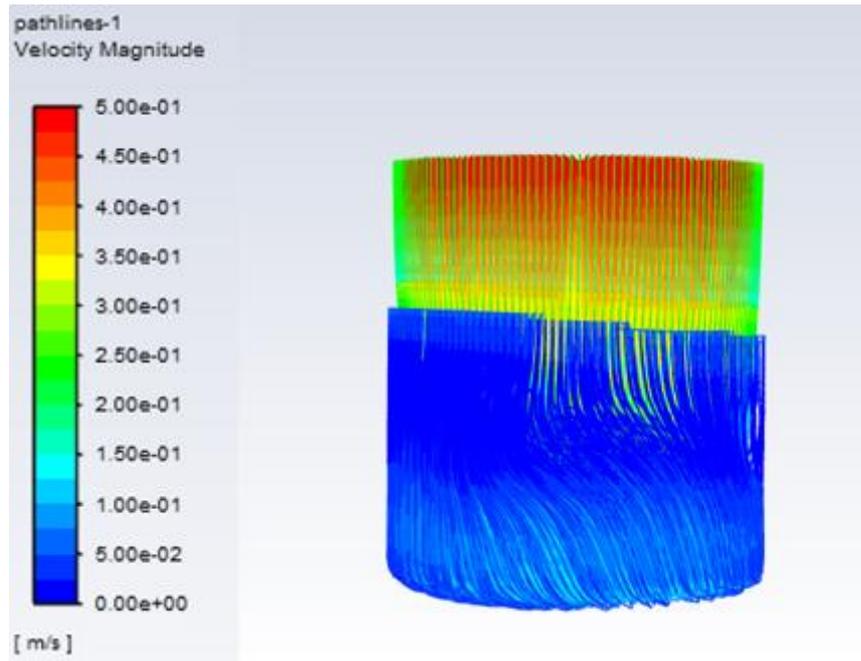


Figura 3.4 Resultado de simulación del fluido en el tanque mediante software ANSYS Fluent®. Fuente: Elaboración propia

Para la soldadura a utilizar en el tanque se tomó en consideración la composición química y los amperajes para los electrodos de tungsteno con 2% de torio afilado en punta de lápiz usando Argón puro o mezclas con referencia a la Norma AWS A 5.9 ER 308L.

Tabla 3.3 Características de electrodos para aceros inoxidable según Norma AWS A 5.9 ER 308L (American Welding Society, 2016)

Composición química según AWS				
C	Cr	Si	Mn	S
0.030% máx	19.0-22.0%	0.30-0.65%	1.00-2.50%	0.030% máx
Ni	P	Cu	Mo	-
9.00-11.00%	0.03% máx	0.75% máx	0.75% máx	-
Medidas disponibles			Amperaje recomendado	
2.4 mm x 900 mm (3/32" x 36")			50-90	
3.2 mm x 900 mm (1/8" x 36")			70-110	

La selección del motor para el agitador se realizó por medio de catálogo en donde se tomó en consideración la velocidad angular de 280 r.p.m. para un momento de 45 Nm.

1.5 kW											
n₂ min ⁻¹	M₂ Nm	S	i	R_{n2} N						IEC	
280	45	2.8	10	1980	W 63_10	S2	M2SB2	126	W 63_10	P90	BN90SA2 127

Figura 3.5 Especificaciones del motorreductor W63_10 S2 M2SB2 para el agitador (Bonfiglioli, 2018)

Por otro lado, para el llenado del tanque, se procede a reutilizar el agua mediante el almacenamiento de la cantidad extraída de la pulpa durante el proceso, para esto se diseñó un tina con las medidas determinadas con el área que ocupa la línea del reciclado sin considerar la sección de corte.

Para poder realizar el retorno se seleccionó una bomba especializada para paso de residuos de fibra de papel en bajo porcentaje, con el fin de evitar el estancamiento de esta.

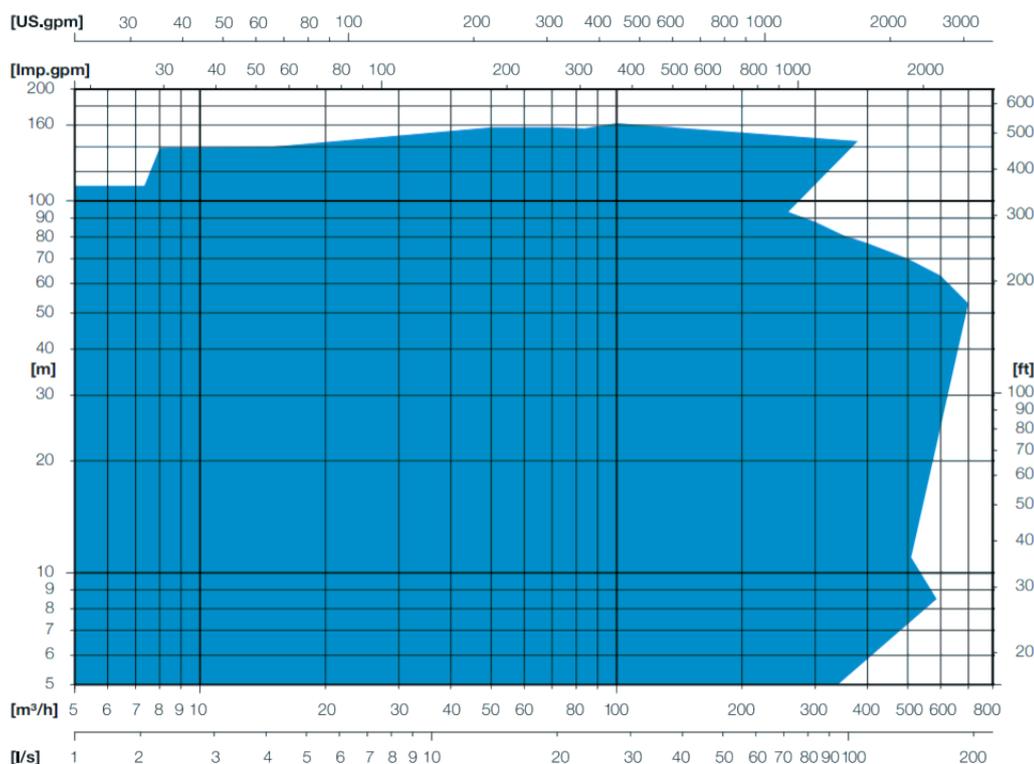


Figura 3.6 Gráfica Caudal-Cabezal para la selección de una bomba centrífuga de una etapa (ANDRITZ, 2017)

Mediante la gráfica presente en la Figura 3.6 se seleccionó el caudal y el cabezal requerido en la operación. Dando como resultado la bomba de menor capacidad, tipo centrífuga de una etapa especializada en pulpa y papel, diseñada según especificaciones de la norma ISO 2858, transportando hasta una consistencia del 8% con un 90% de eficiencia.

Tabla 3.4 Características de la bomba centrífuga de una etapa para retorno de agua según selección del catálogo. Fuente: Elaboración propia

Caudal de la bomba	5 m ³ /h
Cabezal de la bomba	5 m

3.4 Dosificado

Se determinó la cantidad de pulpa a suministrar para posteriormente ser llevada a sus siguientes procesos, se obtuvo que la mezcla consta de 87% agua y 13% papel, por lo que se calculó la cantidad de volumen necesario.

Tabla 3.5 Resultados de proporciones para la pasta a dosificar. Fuente: Elaboración propia

Cantidad de papel	5880 mm ³
Cantidad de agua	39350 mm ³
Volumen total para dosificar	45230 mm ³

Se tomó como base el avance de la banda igual a 2 cm/s, por lo que se estableció el caudal necesario de 45230 mm³/s para la línea.

Por medio del caudal se estableció el tiempo de operación de la línea de reciclaje, este es igual al tiempo de vaciado del tanque. Se determinó el diámetro para la salida del fluido por medio de la ecuación 2.13.

Tabla 3.6 Resultados de dosificación. Fuente: Elaboración propia

Tiempo de operación	2.45 horas
Diámetro de salida	12.5 mm

Para evitar que la pulpa de papel se estanque mientras se dosifica se consideró el ángulo de reposo, esto quiere decir que se aseguró que el paso del fluido hasta la banda transportadora sea constante y sin estancamientos, el ángulo según las características del fluido es igual a 19°.

3.5 Secado

Se obtuvo la temperatura promedio entre la temperatura emitida por la resistencia a 6 m/s y la ambiente, dando como resultado 59 °C, con este dato se determinó el Nusselt y el coeficiente de convección para el sistema.

Tabla 3.7 Resultados de cálculos para Nusselt y coeficiente de convección.

Fuente: Elaboración propia

Nusselt	132
Coeficiente de convección	25.2 W/m ² K

Se seleccionó la curva de secado más cercana a las condiciones de operación de la línea de reciclado, esto es el suministro de aire caliente a 90 °C con una velocidad de 6m/s.

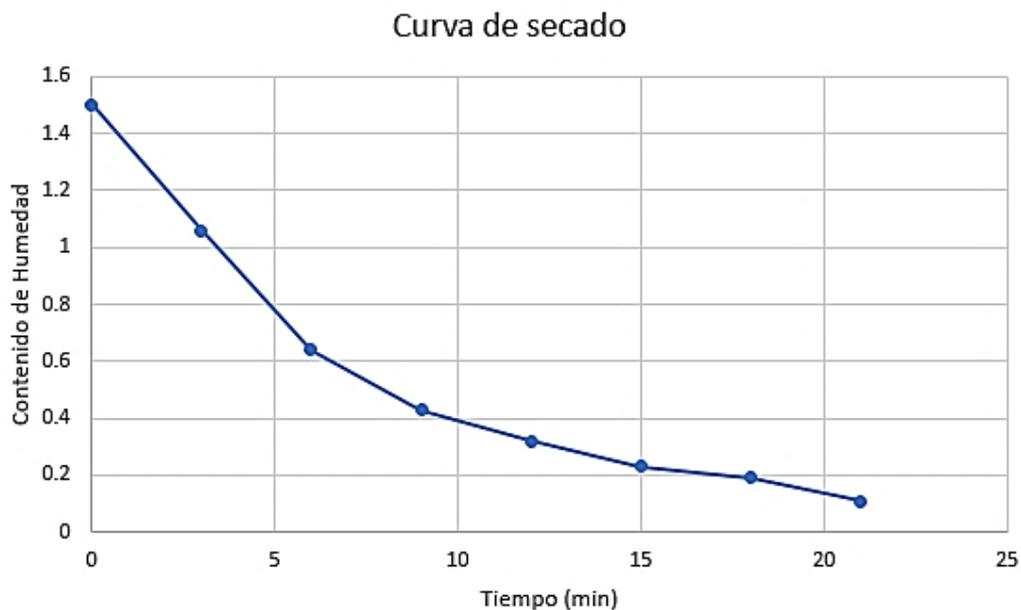


Figura 3.7 Curva de secado experimental para $T_{\text{aire}}=90^{\circ}\text{C}$ y $V=6\text{ m/s}$
(Lima, Pereira & Machado, 2000)

Por medio de los valores presentes en la curva se determinó que el tiempo requerido para pasar de una humedad de 50% a 15% es de 11 minutos, este tiempo indicó la exposición requerida para el área que se tomó como referencia por segundo, esta es 420 mm x 20 mm. Obteniendo así una longitud de banda necesaria de 13200 mm para lograr que el área requerida se exponga durante ese tiempo al secado.

Para la determinación del calor de la cámara de secado primero se determinó el calor sensible de la pulpa de papel y del aire dentro de la cámara, para esto se consideró la variación de temperatura de 25° C a 90° C y a su vez se calculó el calor latente de la pulpa considerando un variación de humedad desde 50% a 10%.

Tabla 3.8 Resultados de calor sensible y latente. Fuente: Elaboración propia

Calor sensible de la pulpa	167.72 kJ
Calor sensible del aire	120.02 kJ
Calor latente de la pulpa	1924.52 kJ

La suma de los calores dio un valor de 2212.26 kJ, este resultado es la energía que necesita la cámara, pero para encontrar los vatios necesarios se lo dividió para el tiempo de secado obtenido de la curva de secado, siendo este de 11 minutos se obtuvo un valor de 3.35 kW.

Para el cálculo de las pérdidas por transferencias de calor se realizó el diagrama de resistencias considerando que la cámara tiene un aislamiento compuesto por una pared de 2" de fibra de vidrio y su estructura de metal externa es de 2 mm de espesor, se logró representar la suma de las resistencias de la configuración determinada.

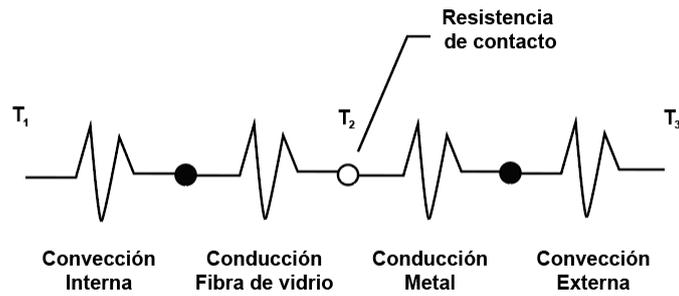


Figura 3.8 Diagrama del sistema de resistencias. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar la Figura 3.8 presenta una configuración de 5 resistencias, debido a que no se conoce el coeficiente de convección en la zona de contacto primero se determinó la suma de las resistencias restantes.

Tabla 3.9 Resultado de las resistencias. Fuente: Elaboración propia

Resistencia de convección forzada	0.053 K/W
Resistencia de conducción en la fibra de vidrio	2.25 K/W
Resistencia de conducción en el Metal	0.000163 K/W
Resistencia de convección natural	0.77 K/W

Por medio de la relación de calor con la resistencia se determinó que la temperatura en el punto de contacto es de 26.5 °C. Por otro lado, se obtuvo el número de Grashof para poder tener el número de Rayleigh y a su vez el coeficiente de convección dando como resultado un valor de 0.66 W/m²K para el mismo, con esto se obtuvo la resistencia de contacto.

Tabla 3.10 Resultado de la resistencia de contacto y la suma total de las resistencia.

Fuente: Elaboración propia

Resistencia de contacto	2 K/W
Resistencia total	5.07 K/W

Finalmente, se obtuvo una pérdida de 12.81 W para una sección de 1.5 m x 0.5 m. En base a las dimensiones de la cámara se multiplicó la pérdida por la cantidad de caras con la misma dimensión, obteniendo una pérdida total de 128.1 W.

Tabla 3.11 Resultado de calor necesario para calentar la cámara. Fuente: Elaboración propia

Calor total
3.48 kW

Por medio del calor total necesario se determinó la carga térmica para el secado, con base en esto se seleccionó resistencias aletadas, estas son especiales para convección forzada.

Modelos	Código	Cota A en mm	Wattios	W/cm ² (°)	Clase térmica constructiva Electricfor	Peso En Kg
Aleta de 25x50 de Aluzinc ó chapa galvanizada mate.	AL001	260	500	4,5	T-700-T	0,38
	AL002	300	600	4,6	T-700-T	0,45
	AL003	370	750	4,6	T-700-T	0,54
Tubo AISI 304 de Ø8 mm	AL004	430	850	4,4	T-700-T	0,62
Racores M12x1,25 de acero zincado (long. Rosca 8 mm).	AL005	500	1000	4,4	T-700-T	0,71
	AL009	620	1250	4,3	T-700-T	0,88
Cota C = 5 mm	AL006	740	1500	4,3	T-700-T	1,1
Cota D = 25 mm	AL007	970	2000	4,3	T-700-T	1,4
	AL008	1180	2500	4,4	T-700-T	1,5

Figura 3.9 Características de la resistencia seleccionada AL006 (BROTOTERMIC, 2017)

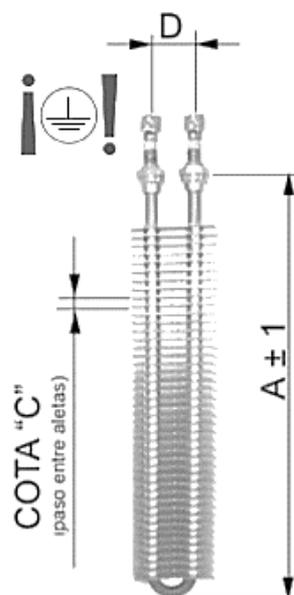


Figura 3.10 Referencia de las dimensiones de la resistencia (BROTOTERMIC, 2017)

Se determinó que se necesitan 3 resistencias de 1500 W, logrando así alcanzar la capacidad de diseño.

Para conseguir la convección forzada se seleccionó un ventilador que alcanza una velocidad de 6 m/s según lo establecido previamente por las características de la curva de secado y asumiendo un área para el ventilador que representa un radio de 40 cm, se obtuvo un flujo de 2715 m³/h para la selección de este.

Se seleccionó un ventilador con capacidad de 3650 m³/h, regulándolo al caudal requerido. Cabe recalcar que se hace uso de un ventilador para cada resistencia.

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A)			Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m ³ /h)	Nivel presión sonora dB(A)	Peso aprox. (Kg)
		220V	380V	660V				
HC-25-2T/H	3312	0,83	0,48		0,12	2200	64	5
HC-25-2M/H	3312	1,1			0,12	2200	64	5
HC-25-4T/H	1740	0,6	0,35		0,1	1300	51	5
HC-25-4M/H	1740	0,63			0,1	1300	51	5
HC-31-2T/H	3336	1,38	0,8		0,18	3650	72	6
*HC-31-2M/H	3336	1,85			0,18	3650	72	6
HC-31-4T/H	1716	0,64	0,37		0,1	2400	54	6

Figura 3.11 Especificaciones del ventilador seleccionado HC-31-2T/H (SODECA, 2012)

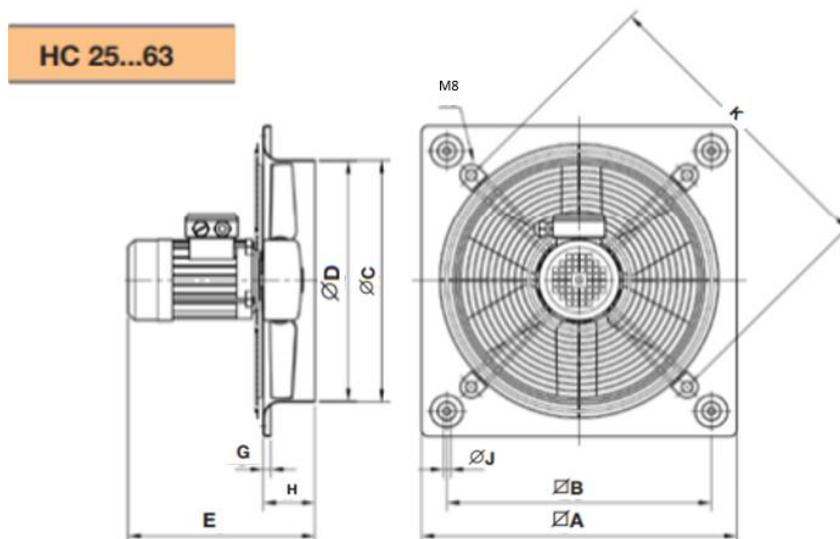


Figura 3.12 Referencias de las dimensiones del ventilador HC-31-2T/H (SODECA, 2012)

Modelo	ØA	ØB	ØC	ØD	E	G	H	ØJ	K
HC-25	330	275	262	260	236,5	11	56	8,5	310
HC-31-2	400	336	310,5	308	264,5	11	65	10,5	380
HC-31-4	400	336	310,5	308	245,5	11	65	10,5	380
HC-35-2	465	390	362,5	360	275,5	11	76	10,5	450
HC-35-4	465	390	362,5	360	256,5	11	76	10,5	450

Figura 3.13 Dimensiones del ventilador HC-31-2T/H (SODECA, 2012)

3.6 Sistema de transmisión

Bajo catálogo se seleccionaron los rodillos para transmisión de movimiento, teniendo en consideración el ancho de la banda y el área del producto, se obtuvieron las siguientes dimensiones.

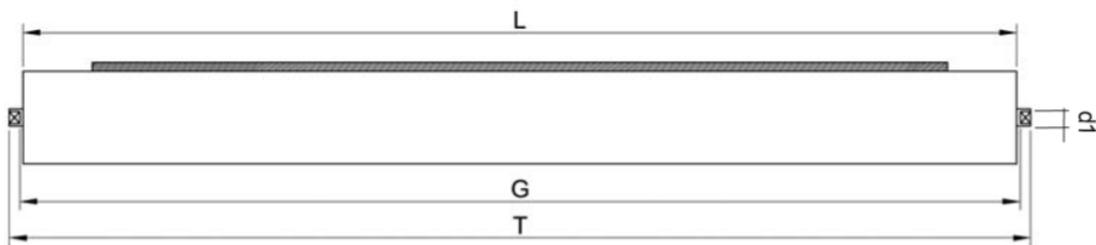


Figura 3.14 Referencia de medidas para la ubicación de los valores presentes en la Tabla 3.12 (ULMA, 2015)

Tabla 3.12 Datos de los rodillos utilizados en la zona de secado. Fuente: Elaboración propia

Ancho de la banda (L)	500 mm
Longitud del rodillo (G)	508 mm
Longitud del eje (T)	532 mm
Diámetro del eje (d1)	25 mm
Diámetro del cilindro	152 mm
Espesor del cilindro	4 mm
Rodamiento	6205

Tabla 3.13 Datos de los rodillos guía. Fuente: Elaboración propia

Ancho de la banda (L)	500 mm
Longitud del rodillo (G)	508 mm
Longitud del eje (T)	526 mm
Diámetro del eje (d1)	20 mm
Diámetro del cilindro	63 mm
Espesor del cilindro	3 mm
Rodamiento	6204

Otro dato conocido dada la selección de los rodillos es su masa, esta se usó como variable de importancia para el diseño del sistema engrane-piñón, además de ser considerada para la simulación de la bancada.

Tabla 3.14 Masa de rodillos. Fuente: Elaboración propia

Rodillo de secado	14.1 kg
Rodillo de guía	4.6 kg

Para el diseño del engrane y el piñón se determinó la carga que se necesita mover en base al peso del producto, lo cual dio como resultado 2604 N, con este valor como fuerza tangencial y el ángulo de presión igual a 20°, se calculó el número de dientes para el piñón y el engrane por medio de la relación de velocidades a reducir, en donde se obtuvo una relación de 1/3. Cabe recalcar que el material de los engranes es AISI 8620, acero utilizado en aplicaciones que requieren alta dureza y resistencia al desgaste superficial, generalmente en la industria automotriz o de maquinarias.

Tabla 3.15 Datos del sistema engrane-piñón. Fuente: Elaboración propia

Número de dientes del Piñón	21
Velocidad del piñón	21
Número de dientes del engrane	63
Velocidad del engrane	7
Módulo	3

Se demostró que el engrane y el piñón son resistentes por medio de la determinación de los factores de seguridad para cada elemento.

Tabla 3.16 Factores de seguridad del piñón. Fuente: Elaboración propia

Factor de seguridad de esfuerzo de flexión	1.8
Factor de seguridad de esfuerzo superficial	1.6

Tabla 3.17 Factores de seguridad del engrane. Fuente: Elaboración propia

Factor de seguridad de esfuerzo de flexión	2.1
Factor de seguridad de esfuerzo superficial	1.8

3.6.1 Selección de motor

Por medio de catálogo se seleccionó el motor utilizado para el movimiento del tambor motriz, se consideró el cumplimiento de las condiciones de trabajo y la potencia necesaria.

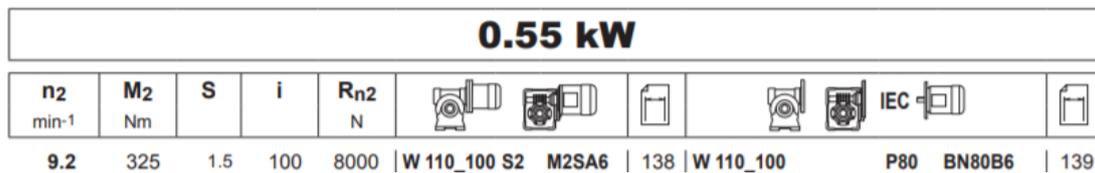


Figura 3.15 Especificaciones del motorreductor W110_100 S2 M2SA6 para el tambor motriz (Bonfiglioli, 2018)

3.6.2 Banda transportadora

La banda se seleccionó considerando la resistencia a altas temperaturas y al desgaste, además de su capacidad para operar en un ambiente con humedad alta, dado esto se optó por una banda de fibra de vidrio recubierta de teflón comúnmente utilizada para procesos de cocción de alimentos, presenta una resistencia a productos químicos e impermeabilidad que hacen que el prensado de la pulpa sea más eficiente. Por otro lado, soporta temperaturas entre -73 °C y 270 °C (Provecuador, 2014).

Para la obtención de las fuerzas tensoras que actúan sobre la banda se calcularon las variables de las que dependen estas fuerzas.

Tabla 3.18 Resultados de las variables y las fuerzas tensoras en la banda.

Fuente: Elaboración propia

Fuerza tangencial de arranque	4166.33 N
Coefficiente de fricción de arranque	0.45
Ángulo de trabajo	180°
Fuerza tensora mayor	5505.46 N
Fuerza tensora menor	1339.14 N

La fuerza del lado más tenso tiene que ser mayor a la fuerza tangencial para lograr el movimiento del sistema de rodillo en la línea de reciclado, por consiguiente, del otro lado del tambor se tiene una tensión mucho menor para no generar presión sobre la banda y evitar un daño por rotura.

3.7 Simulación de bancada

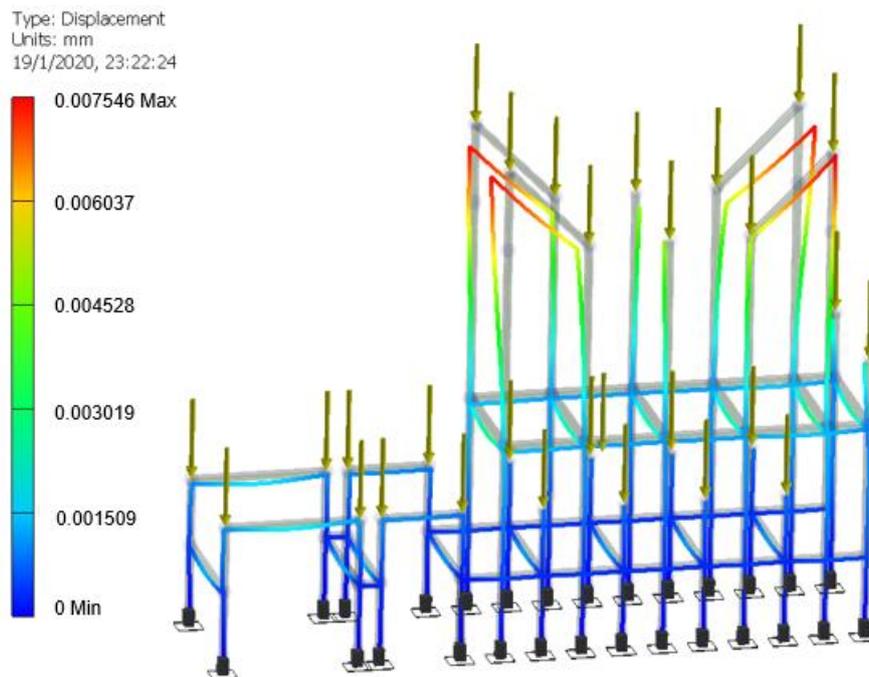


Figura 3.16 Resultados de deformación en la bancada. Fuente: Elaboración propia

Type: Safety Factor
Unit: ul
19/1/2020, 23:27:52

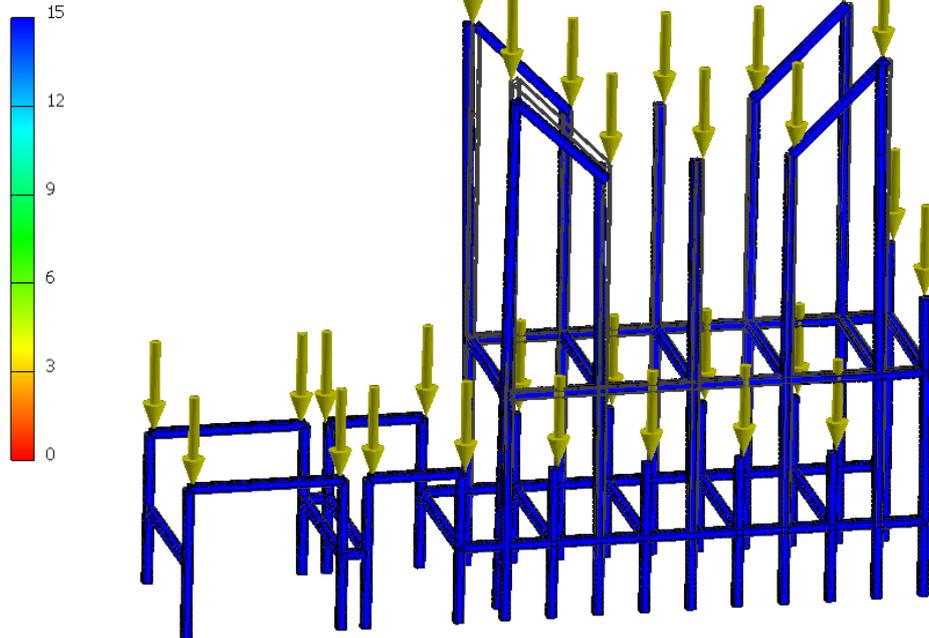


Figura 3.17 Resultado de factor de seguridad. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en los resultados de las simulaciones la deformación de la estructura es despreciable en comparación con la longitud y separación entre las vigas, esto se da debido a que las cargas a soportar son bajas, dado que el factor de seguridad es mayor a 1 se confirmó que la bancada con tubo cuadrado de 25 x 1.25 mm de acero estructural ASTM A36 no falla según los valores en la Figura 3.17.

Para la soldadura a realizar en la bancada se consideraron normativas que indican los parámetros a seguir para la unión de estructuras de material ASTM A36, se tomó como guía el Código AWS D1.1 y la norma NTE INEN 1 390, estas recomiendan variedades de electrodos para soldar este material por medio del método SMAW.

3.8 Corte

Con las aproximaciones realizadas se obtuvieron las características del cartón antes del corte.

Tabla 3.19 Resultados de propiedades del cartón. Fuente: Elaboración propia

Propiedades del cartón	
Gramaje	$750 \frac{g}{cm^3}$
Espesor	700 μm
Densidad	$1.07 \frac{g}{cm^3}$
Fuerza de corte necesaria	0.94 N

Estos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos para clasificar el producto como cartón, por otro lado, los valores son mayores a los que presenta una hoja papel bond por lo que se confirma las características de cartón.

Tabla 3.20 Rangos de propiedades para cartones
(Association of European Cartonboard and Carton Manufacturers, 2014)

Propiedades generales de cartón	
Gramaje $\left[\frac{g}{m^2} \right]$	> 160
Espesor [μm]	$350 < t < 800$

3.8.1 Cuchilla de corte

Cumpliendo con la restricción de longitud se seleccionó una cuchilla de acero rápido utilizada en guillotinas manuales con una capacidad de corte para formatos A3 de máximo 200 hojas, además de ser de un material que mantiene su dureza a altas temperaturas y aleado con tungsteno para mejorar su resistencia a la abrasión, considerar la capacidad de corte permitió especificar el ángulo deseado para el bisel correspondiente a la recomendación de cartón de fibra, el mismo que presenta en el espesor especificado de salida una densidad similar al cartón producido.

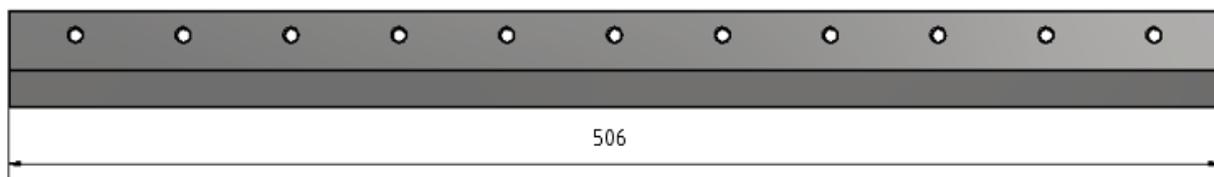


Figura 3.18 Modelado de la cuchilla con representación de la medida de longitud en [mm]

Fuente: Elaboración propia

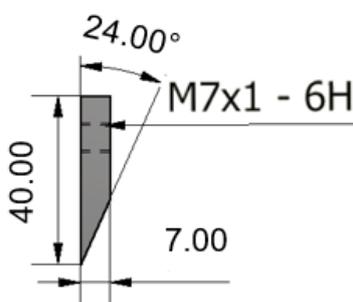


Figura 3.19 Medidas en [mm] de sección transversal de la cuchilla. Fuente: Elaboración propia

3.8.2 Cilindro neumático

Tabla 3.21 Valores de referencia para inicio de iteración. Fuente: Elaboración propia

Fuerza de retroceso de referencia	12.85 N
Diámetro de vástago	12 mm

Se obtuvo un diámetro de referencia para el émbolo igual a 20.02 mm, con esto se seleccionó un cilindro CCM2515 con un diámetro de émbolo de 25 mm, valor más próximo al referencial según el catálogo (NEUMAIC, 2017), el mismo tiene una carrera de 15 mm suficiente para realizar el corte y aporta una fuerza real mayor a la mínima necesaria según datos calculados con un diámetro de émbolo mayor al mínimo necesario.

Tabla 3.22 Valores característicos del cilindro neumático CCM2515 (NEUMAIC, 2017)

Diámetro de émbolo	25 mm
Diámetro de vástago	10 mm
Fuerza de retroceso teórica	26.25 N
Fuerza de retroceso real	23.62 N

3.8.3 Compresor

Dada la velocidad de la banda 20 cm/s, se calculó el número de ciclos por minuto cuando se realiza un corte cada 297 mm, con esta referencia se obtuvieron los resultados para el consumo de aire del pistón.

Tabla 3.23 Datos de trabajo, consumo del cilindro neumático y potencia del compresor.

Fuente: Elaboración propia

Número de ciclos por minuto	4
Consumo	0.028 L/cm
Carrera	1.5 cm
Consumo por ciclo	0.34 L/min
Presión de trabajo	200 KPa
Potencia mínima del compresor	1.50×10^{-3} HP

Por lo tanto, un compresor de 1/4 HP cumple con la potencia necesaria para impulsar el cilindro mecánico y lograr realizar 4 ciclos completos en el periodo de 1 minuto según lo requerido.

Tabla 3.24 Características del compresor RL-03-30 (Rong Long, 2019)

Voltaje	110 V, 60HZ, Monofásico	
Presión máxima	100 PSI	
Carga máxima	52 Lt/min	
Recarga	70 PSI	
Motor	1/4 HP, 4 polos, 1740 R.P.M.	

3.8.4 Estructura para área de cortado

Se realizó una simulación para comprobar el soporte que da la bancada en el área de cortado, las fuerzas consideradas fueron la real dada por el pistón y el peso de la cuchilla, al igual que la unión al pistón como medio de traslado de fuerza y movimiento.

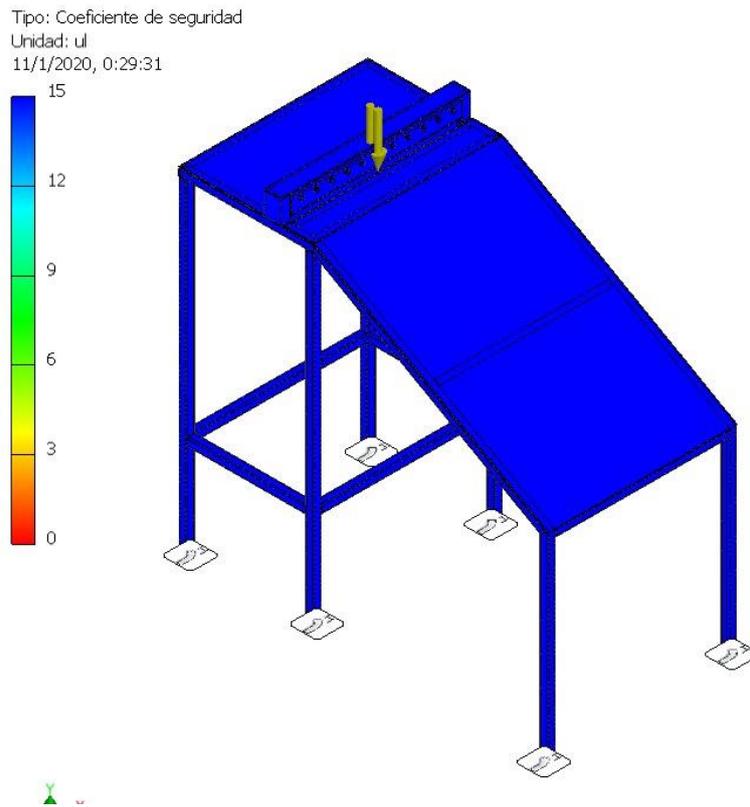


Figura 3.20 Resultado de coeficiente de seguridad en la bancada del área de corte.

Fuente: Elaboración propia

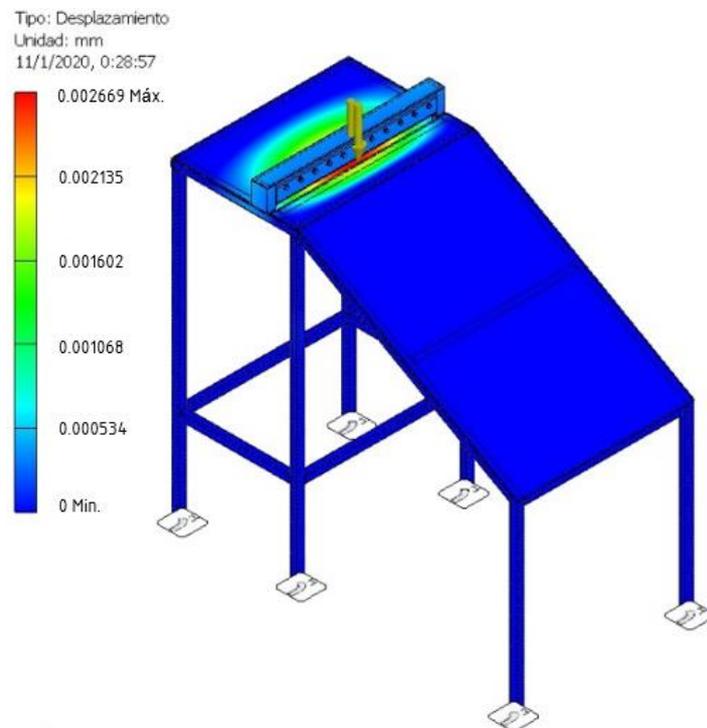


Figura 3.21 Resultado de desplazamiento o deformación en la bancada del área de corte.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en ambas simulaciones, la deformación es despreciable en comparación al tamaño de la estructura y el coeficiente de seguridad supera a 1, esto quiere decir que la bancada proporciona la estabilidad y soporte necesario.

3.9 Proyección del reciclado de papel en la institución universitaria

El 58% de las personas entrevistadas no reciclan, esto se debe a diferentes factores, entre ellos se resaltó que el no saber el paradero del papel luego de ser desechado disminuye el interés por separarlo. Sin embargo, de todos los encuestados el 97% estaría dispuesto a realizar la clasificación de sus desechos si se pone a disposición un método seguro e información sobre el mismo.

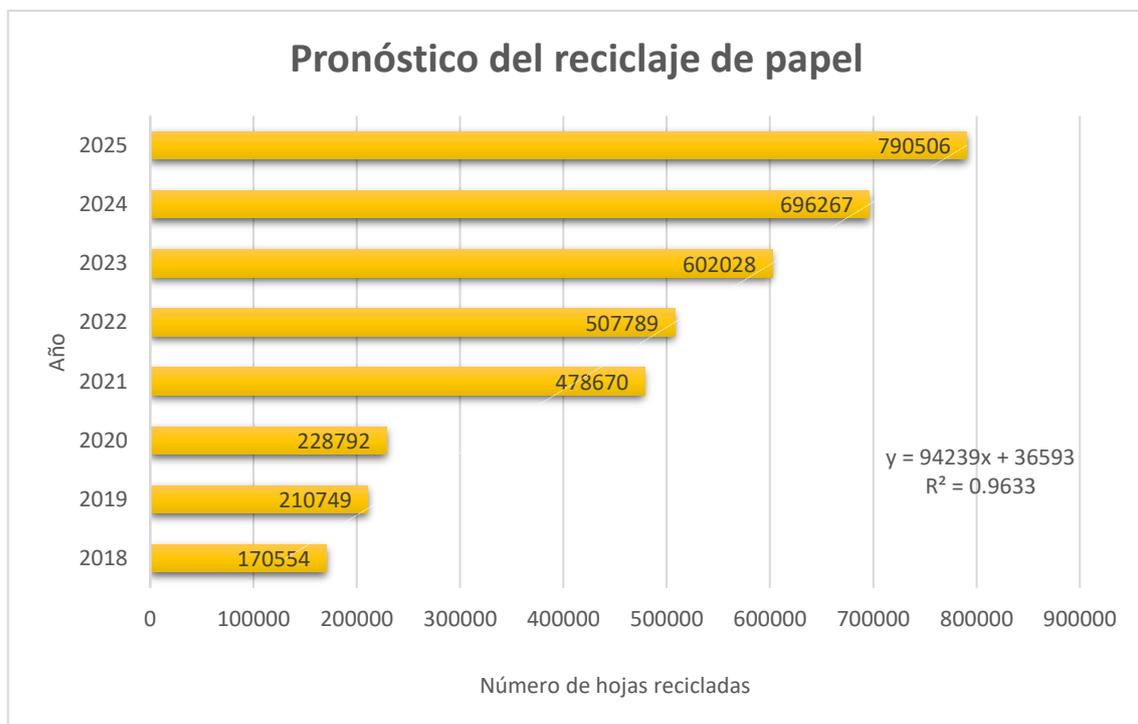


Figura 3.22 Proyección sobre el reciclaje de papel en la institución universitaria.

Fuente: Elaboración propia

Por medio de los datos adquiridos en las encuestas se realizó una regresión lineal para determinar la tendencia que tendrá el reciclado de papel al momento de implementar la línea, se tomaron como valores de referencia los datos de los 2 últimos años y se pronosticó el año actual. Además, se consideró la implementación de la línea en el año 2021 en donde el valor utilizado de hojas a reciclar es el estimado por medio de las

encuestas, con esto se logró obtener la cantidad de hojas a reciclar para los próximos 4 años.

La tendencia es ascendente como se puede observar en la Figura 3.22, es decir que para los siguientes años existirá un crecimiento en el reciclaje de papel pero este no es brusco debido al aumento en compra de hojas que a su vez significa mayor almacenamiento en administración, por lo que solo una parte de esto se agregó a la cantidad de reciclaje.

3.10 Análisis de costos

Se determinó el costo total de fabricación de la línea, para esto se tomó en consideración el costo de materia prima para cada sección y la mano de obra.

Tabla 3.25 Resumen de costos de fabricación. Fuente: Elaboración propia

Triturado	\$ 945.00
Mezclado-Dosificado	\$ 1,547.22
Sistema de Transmisión	\$ 4,233.86
Secado	\$ 1,713.27
Corte	\$ 605.69
Bancada	\$ 862.67
Sección de retorno de agua	\$ 1,203.07
TOTAL	\$ 11,110.78

Con esto se procedió a calcular los indicadores de rentabilidad para el proyecto, es decir el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Se realizó un flujo de caja para 5 años de operación de la línea.

Se estimó el ingreso por ventas del producto con un precio unitario de \$0.30 y la cantidad a producir estimada según la proyección de reciclaje previamente descrita. Por otro lado, se estableció un gasto de \$410 que comprende el sueldo y aportaciones de un trabajador de medio tiempo para operar la máquina y recolectar el papel dentro de la institución, este valor debe aumentar al momento de que la demanda de papel sea mayor a la capacidad de la línea, ya que se requerirían más horas de trabajo. Sin embargo, dado que en 5 años no se alcanza la capacidad máxima de la máquina el sueldo se mantiene constante. Además,

se determinó el consumo de agua y electricidad mensual para la línea, con lo que se estableció un costo de operación.

Tabla 3.26 Resultados de costos de operación para la línea de reciclaje.

Fuente: Elaboración propia

Consumos	Consumo mensual	Costo de operación mensual
Consumo eléctrico	401.61 kWh	\$ 40.16
Consumo de agua	1.88 m ³	\$ 2.18
Total		\$ 42.34

Finalmente, se estableció un costo de mantenimiento anual, cabe recalcar que la línea debe ser limpiada a diario por lo que ese mantenimiento preventivo se encuentra cubierto dentro de las actividades diarias.

Tabla 3.27 Gastos anuales de la línea de reciclaje. Fuente: Elaboración propia

Gasto	Costo Anual
Sueldo de operador	\$ 4,920.00
Costo de operación	\$ 508.04
Costo de mantenimiento	\$ 135.00

Se consideró un capital de trabajo igual a los gastos de operación y el gasto en el operador para un mes, esto se tomó en cuenta en el año 0 para tener un valor inicial en el primer mes de arranque de la línea. Dado esto, con los valores de ingresos y gastos previamente especificados se obtuvo el flujo neto desde el año 0 al 5.

Tabla 3.28 Resultado de flujo neto para 5 años de operación. Fuente: Elaboración propia

AÑO	0	1	2	3	4	5
Flujo Neto	\$-11,563.12	\$11,489.16	\$12,472.70	\$15,665.65	\$18,858.60	\$22,051.55

Tabla 3.29 Resultados de indicadores de rentabilidad. Fuente: Elaboración propia

VAN (15%)	\$39,905.00
TIR	109%

Como se puede observar en la Tabla 3.28 el valor de la inversión para la fabricación de la línea se recupera en el segundo año de operación. Además, el valor actual neto (VAN) es positivo con un tasa de descuento de 15% lo que significa que hay viabilidad, dado que se consideró que la inversión no se da mediante préstamo, la tasa se estableció mayor al porcentaje de ganancia que se tendría al invertir la misma cantidad de dinero en un banco. Por otro lado, la tasa interna de retorno (TIR) es mayor a 100% lo que indica que el proyecto tiene una alta rentabilidad.

3.11 Impacto social

Uno de los primeros aspectos sociales que da a resaltar la línea de reciclado es la generación de empleo, para este caso al inicio de una producción se requiere de un mínimo de un operador. Sin embargo, como se pronosticó previamente se genera un incremento del reciclaje en la institución, esto se interpreta como una necesidad de aumento de la carga laboral lo que tiene como consecuencia la contratación de más personal.

Por otro lado, mediante las encuestas se determinó el impacto que da la generación de conciencia ambiental al momento de introducir el tema y dar a conocer alternativas para el reciclaje de papel. Se obtuvo un aumento del 55% de interés por parte de los encuestado, los mismos que en su mayoría resaltaron querer saber sobre los resultados del estudio y el momento en que se pondrá en marcha el proyecto.

3.12 Impacto Ambiental

En la actualidad, el papel comúnmente es desechado junto a diferentes residuos, dado que este material es difícil de separar una vez que se mezcla, este se considera una pérdida. Al recolectar el papel para procesarlo mediante la línea de reciclado se evita que 19.25% de lo consumido termine desechado en un vertedero común.

Este porcentaje de 19.25% equivale a 478670 hojas. Para la elaboración de 8000 hojas se tala en promedio un árbol de 40 años, por esto al realizar un reciclaje de

papel con la demanda que presenta la institución se salvan aproximadamente 60 árboles anuales, cabe recalcar que este valor es solo para el primer año de funcionamiento por lo que se espera un incremento en este enfoque.

Capítulo 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. Se logró diseñar una línea de reciclado de papel para la obtención de cartón prensado por medio de normativas, patentes, estudios de investigación y catálogos.
2. Mediante un levantamiento y análisis de información en la institución universitaria se determinó el alcance de la recolección de papel para la línea y un aumento de reciclaje de papel aproximado a 1.45% por año, a partir del primer año.
3. Para el sistema de triturado se utilizó un diseño de selección, donde se establecieron parámetros a cumplir para determinar el equipo más conveniente, cumpliendo las normas DIN 32757-1 / DIN 66399 y con corte tipo partícula ideal para documentos confidenciales.
4. El tanque se diseñó estableciendo una capacidad del 200% de la demanda actual, obteniendo así un volumen útil de 0.4 m^3 para la producción diaria, se determinó que el material óptimo es el acero inoxidable AISI 304 con un espesor de 2 mm determinado por norma API 650, dado que su aplicación en este caso es para almacenamiento de pulpa de papel. El flujo del fluido dentro del tanque tiene que estar en constante movimiento por lo que se diseñó un agitador que realiza un mezclado de manera uniforme para las partículas de papel y el agua, logrando homogeneidad a una velocidad de 280 r.p.m. siendo mucho menor a la velocidad crítica, lo que se comprobó por medio de una simulación.
5. En cuanto al sistema de dosificado de la línea de reciclado, se tiene la distribución de la pulpa mediante caída por gravedad, se obtuvo un tiempo de operación de 2.45 horas hasta utilizar toda la mezcla de la pulpa a un caudal de $45230 \text{ mm}^3/\text{s}$, además se aseguró el paso del fluido mediante la consideración del ángulo de reposo de la pulpa igual a 19° al momento de ser dosificada.
6. Para el secado se tuvo un tiempo de 11 minutos, este es el necesario para remover la humedad hasta alcanzar un 10% en el producto, se consideró un

área de operación del secado de 420 mm x 20 mm moviéndose por la banda a una velocidad de 2 cm/s, esta es calentada por medio de 3 resistencias eléctricas con capacidad de 1500 W cada una de ellas insufla aire a 90 °C mediante 3 ventiladores regulados con un flujo de 2714 m³/h cada uno, obteniendo así una velocidad de 6 m/s dentro de la cámara.

7. La distribución de rodillos dentro de la cámara de secado permite que el proceso se cumpla dentro de un área de 0.75 m², es decir logra que al finalizar el proceso de secado se obtenga los parámetros de humedad requeridos en el tiempo especificado al pasar la banda con el producto en ese espacio.
8. La bancada de la línea de reciclado se diseñó bajo un concepto de simulación, determinando la deformación y el factor de seguridad, asegurando así que no falla, es decir que soporta las cargas muertas sobre ella.
9. Los rodillos fueron seleccionados mediante catálogo, estableciendo restricciones de dimensión en relación con el ancho de la banda transportadora, esta banda fue determinada según el tipo de aplicación, resistencia a altas temperaturas y al desgaste, el material seleccionado fue fibra de vidrio con recubrimiento de teflón. Se logró asegurar un movimiento uniforme para los rodillos por medio del análisis de la tensión de banda, sabiendo que el tambor motriz soporta 2 fuerzas de tensión una mayor a la otra.
10. Para la línea de reciclado se determinó que el sistema más eficiente de transmisión de potencia para el movimiento del tambor motriz es el de engrane-piñón, cuyos elementos se diseñaron bajo factor de seguridad y con el material AISI 8620 adecuado a la aplicación, dado que el factor es mayor a 1 indica que el sistema no falla.
11. En cuanto a la soldadura para las partes de la línea de reciclado se utilizó la norma AWS A 5.9 ER 308L para el soldado de acero inoxidable y la NTE INEN 1 390 para el metal estructural ASTM A36, ya que se consideró que el tipo de soldadura depende de la aplicación y del material a soldar.
12. Se logró determinar las características del producto y su resistencia al corte, con lo que se seleccionó el cilindro neumático para el que se consideró el consumo de aire y la potencia que requiere del compresor. Obteniendo un corte cada 14.85 segundos, dando la dimensión al producto de un formato A3.

13. El costo de fabricación de la línea es igual a \$11,110.78, al analizar la demanda que genera la institución el valor de la inversión se recupera en el segundo año de operación. Este es un tiempo aceptable como se comprobó mediante indicadores, ya que el valor actual neto (VAN) es positivo y la tasa interna de retorno presenta una rentabilidad alta de 109%.
14. Se logró plantear y modelar un diseño de la línea de reciclado que necesita un área de 4.08 m², la cual es menor en comparación con el área de 30 m² que ocupan las líneas completas de reciclado que se encuentran en el mercado para una capacidad similar. Además, la línea cumple con el objetivo de satisfacer la demanda generada por el consumo de papel en la institución, comprobando con la proyección del reciclaje de papel que la línea cuenta con la capacidad necesaria para abastecer incluso el aumento de consumo para los próximos 5 años, ya que en el último año solo se alcanzaría el 82.34% de su capacidad.

4.2 Recomendaciones

1. Se recomienda realizar estudios, análisis químicos y pruebas para diferentes composiciones de la pulpa de papel, ya que esto puede mejorar el rendimiento de la pulpa al momento de ser procesada y aumentar la calidad del producto.
2. Para el acero estructural se recomienda ver la viabilidad de realizar un galvanizado, dado que aumenta la resistencia a la corrosión y la estructura se encuentra expuesta a humedad y presencia de agua en los procesos dentro de la línea.
3. Se recomienda realizar un tratamiento para el agua residual producida por el proceso de reciclado, ya que estas aguas tienen que ser retornadas a la red pública sin contaminantes mediante filtros y tratamiento químico. Por otro lado, con un proceso de recuperación puede ser utilizada nuevamente en la línea.
4. Si se desea eliminar el sistema de transmisión de potencia del engrane piñón, se puede explorar la posibilidad de implementar un variador de frecuencia que permita regular los r.p.m. de salida del motor.
5. El sistema de dosificado puede ser realizado por medio de una bomba para obtener una mayor eficiencia, pero se debe considerar que esto aumentaría el

consumo eléctrico y que el volumen del tanque en esta aplicación debería tener mayor capacidad para compensar esta implementación.

6. Se recomienda realizar experimentaciones para determinar nuevas curvas de secado con diferentes parámetros, teniendo como fin buscar condiciones más eficientes para el tipo de producto y composición de la pulpa, estableciendo un nuevo tiempo óptimo para el proceso de reciclaje de papel.
7. Además de la venta de cartón prensado se pueden explorar diferentes variaciones del producto elaborado a partir del reciclaje de papel para obtener diversidad y mayor comercialización con base en la línea de reciclado.
8. Se recomienda realizar una recopilación de información sobre la cantidad de papel que procesa la línea por año, para tener así datos reales y puntuales, logrando un control sobre la producción, además de poder realizar una comparación con los datos determinados por la tendencia y establecer una base de recolección de papel.
9. Se recomienda realizar un mantenimiento de la línea tomando en consideración las horas de funcionamiento y establecer un programa más detallado para un mejor control con programación de mantenimientos preventivos y pasos a seguir en los correctivos, dependiendo de la carga operacional a la que se someta.
10. Cuando se supere la capacidad de diseño del tanque, se puede aumentar el trabajo de la línea de reciclado hasta alcanzar las 8 horas laborables, logrando así procesar hasta 3 veces la capacidad máxima del tanque en un día. Para esto se sugiere considerar la implementación de 2 trabajadores, ya que la carga laboral sería mayor.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, N. (2004). *El reciclado de papel y cartón*. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/294/29405308.pdf?fbclid=IwAR3Km17Sp5VTmHyprYvyCfNWwKE3kTU4KUpjJTcbGeRZXvGPfJD5Tlo2mw>
- American Welding Society. (2016). NORMA AWS A 5.4 E 308L-16. Recuperado 26 diciembre, 2019, de http://www.infrasur.com.mx/uploads/manuales/soldadura/manual_electrodos/aceros_inox.pdf
- ANDRITZ. (2017). Bombas y motores ANDRITZ. Recuperado 5 enero, 2020, de <https://www.andritz.com/resource/blob/34996/2554a70386c1d869ec96542b39bc9a1a/hy-andritz-pumps-portfolio-es-data.pdf>
- Area, M. C. (2008). *Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica 2008* (Ed. rev.). Recuperado de http://www.eucalyptus.com.br/artigos/2008_Area_Panorama+Industria+Celulosa+Papel.pdf
- Arévalo, C. (2010). *IMPLEMENTACION DE UN MECANISMO AUTOMATIZADO EN LA CUCHILLA DE UNA GUILLOTINA MANUAL PARA REDUCIR TIEMPOS DE CORTE EN LA IMPRENTA AREVALO DE LA CIUDAD DE AMBATO*. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/1802>
- Association of European Cartonboard and Carton Manufacturers. (2014). *Una guía de la terminología utilizada en la industria de la fabricación de cartón y de los envases de este material*. Recuperado de <https://www.procarton.com/wp-content/uploads/2014/08/glossaryspanish1.pdf>
- Atiemo-Obeng, V. A., Paul, E. L., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. New jersey: Wiley-Interscience.
- Bajpai, P. (2014). Environmental Aspects of Recycling. *Recycling and Deinking of Recovered Paper*, , 271–282. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-416998-2.00015-5>
- Bhattacharjee, D., & Kamrul Islam, M. D. (2014). *Development of a paper recycling process*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/270877262_DEVELOPMENT_OF_A_PAPER_RECYCLING_PROCESS

- Bolívar, R. (2013). *ANÁLISIS, DISEÑO Y MODELAMIENTO POR ELEMENTOS FINITOS DEL EJE PARA UN AGITADOR MECÁNICO DE LA EMPRESA FLOW CONTROL AND HANDLING S.A.*. Recuperado de <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/5248/1/TME01629.pdf>
- Bonfiglioli. (2018). Serie VF-W Reductores de tornillos sin fin. Recuperado 7 enero, 2020, de https://www.bonfiglioli.com/BR_CAT_VF-W_STD_SPA_R07_2_1.pdf
- BROTOTERMIC. (2017). Resistencias eléctricas calefactoras. Recuperado 17 enero, 2020, de <http://www.brototermic.com/docs/catalogo-resistencias-calefactoras.pdf>
- CEPI, ERPA, & FEAD. (2014). *Paper and board-European list of standard grades of paper and board for recycling.* Recuperado de https://www.wepa.de/fileadmin/user_upload/pdf/lieferanten/Englisch/06_Altpapier/FD-GR-6105_EN_List_of_waste_paper_grades.pdf
- Comesaña, A. (2013). *Metodología para la generación y selección de alternativas de diseño considerando múltiples factores de un modo holístico.* Recuperado de <http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/203/Metodolog%c3%ada%20para%20la%20generaci%3%b3n%20y%20selecci%3%b3n%20de%20alternativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Da Silva Campos, E. (2009). *Curso de Fabricación de papel.* Recuperado de https://www.academia.edu/39676692/CURSO_DE_FABRICACION%3%93N_DE_PAPEL
- Da Silva, E. (2009). *Curso de preparación de la pasta.* Recuperado de http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2009_Curso_Preparacion_Pasta.pdf
- Ecuavisa. (2019, 29 abril). Guayaquil produce a diario 4.200 toneladas de basura. Recuperado 7 noviembre, 2019, de <https://www.ecuavisa.com/articulo/noticias/nacional/484146-guayaquil-produce-diario-4200-toneladas-basura>
- Ervasti, I. (2016). Wood fiber contents of different materials in the paper industry material chain expressed in roundwood equivalents (RWEs). *Silva Fennica*, 50(4), 7. <https://doi.org/10.14214/sf.1611>
- FASSCO. (2017). FASSCO Maschinenmesser - Recomendaciones de ángulos del bisel para cuchillas guillotinas. Recuperado 13 diciembre, 2019, de <http://www.fassco.de/es/service/schnittwinkel-fuer-papierschneidmesser.html>

- Festo. (2016, diciembre). Información Técnica. *Catalogo Festo*, 1(3). Recuperado de https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/334159/Techinfo_es.pdf
- Greenpeace. (1997). *Impactos de la producción de papel*. Recuperado de <http://www.administracion.usmp.edu.pe/institutoconsumo/wp-content/uploads/2013/08/Impactos-de-la-produccion-de-Papel-GREENPEACE.pdf>
- Habasit. (2012). Guía de ingeniería y diseño de cintas transportadoras. Recuperado 1 enero, 2020, de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut84/anx1tut84.pdf>
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4ª ed.). Ciudad de México, México: Pearson Educación.
- Innovaciones Tecnológicas. (2018). Destructoras Documentos HSM & Fellowes Distribuidor en Ecuador. Recuperado 26 diciembre, 2019, de https://www.innovaciones.ec/destruccion-documental?gclid=EAlaIQobChMI_5D8mvr75QIVibWzCh2TKg6jEAAAYASAAEgJQwvD_BwE
- Interempresas. (2006, 1 diciembre). Dosificación en continuo para la fabricación de papel en la Papelera Brandia. Recuperado de <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/15507-Dosificacion-en-continuo-para-la-fabricacion-de-papel-en-la-Papelera-Brandia.html>
- Isaev, N., Clark, M. R., & Davidson, D. J. (2010). The Role of Paper Consumption. *Sustainability: The Journal of Record*, 3(3), 171–177. <https://doi.org/10.1089/sus.2010.9772>
- Jadhav, A. S., & Sonar, R. M. (2011). Framework for evaluation and selection of the software packages: A hybrid knowledge based system approach. *Journal of Systems and Software*, 84(8), 1394–1407. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.03.034>
- Koski, E. (1992). *HOT-PRESSING AND DRYING DEVICE*. Recuperado de <https://patentimages.storage.googleapis.com/d1/b5/c3/941c49aaaaa652/US5092962.pdf>
- Norton, R. L. (2009). *DISEÑO DE MAQUINARIA* (4ª ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana de España S.L..
- Lima, O. M., Pereira, N., & Machado, M. (2000). Generalized drying curves in conductive/convective paper drying. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 17(4-7), 539–548. <https://doi.org/10.1590/s0104-66322000000400018>
- López, E. (2005). *Fabricación de pasta de celulosa-Aspectos técnicos y contaminación ambiental*. Recuperado de <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/CyT6/6CyT%2005.pdf>
- White, F. M.. (2004). *Mecánica de Fluidos* (5ª ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.

- Martinez, J., & Hidalgo, M. (2010). *El papel: 2.000 años de historia*. Recuperado de <http://amigosarchivojerez.com/wp-content/uploads/2015/05/El-papel-2000-a%C3%B1os-de-historia-Art%C3%ADculo.pdf>
- Ministerio del ambiente. (2018, 31 enero). Ecuador Recicla, una apuesta para proteger nuestro planeta | Ministerio del Ambiente. Recuperado 7 noviembre, 2019, de <http://www.ambiente.gob.ec/ecuador-recicla-una-apuesta-para-proteger-nuestro-planeta/>
- Ministerio del ambiente. (2019, 30 enero). 26. Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS) – INABIO. Recuperado 7 noviembre, 2019, de <http://inabio.biodiversidad.gob.ec/2019/01/30/26-gestion-integral-de-desechos-solidos-pngids/>
- Misman, M., Wan Alwi,, S., & Manan, Z. (2008). State of the art for paper recycling. In University Teknologic MARA (Ed.), *International Conference on Science and Technology* (pp. 1–5). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Sharifah_Rafidah_Wan_Alwi2/publication/268205602_STATE-OF-THE-ART_FOR_PAPER_RECYCLING/links/568727cd08ae197583976746/STATE-OF-THE-ART-FOR-PAPER-RECYCLING.pdf
- Moreno, P. (2006). *Disminución de los costos de producción en la fabricación del papel kraft en cartorama C.A.* Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/5819/1/industrial%203320.pdf>
- NEUMAIC. (2017). CILINDROS COMPACTOS MULTIMONTAJE. Recuperado de neumaic.com/files/Cilindros-Neumaticos-y-Actuadores-Rotativos/02%20Cilindros%20compactos.pdf
- New Technology Network Corporation. (2004). *Rodamientos de Bolas y de Rodillos*. Recuperado de <http://www.elementosindustriales.com/web/pdf/CATALOGOGENERAL.pdf>
- Neyra, S., Trigoso, J., & Santa María, N. (2013). *Diseño-Construcción e Instalación de Tanque Agitador*. Recuperado de <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/1962/T-660-N51-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Normalización Española. (2010). UNE-EN 15713:2010 Destrucción segura del material confidencial. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0044792>

- Ocon, J., & Tojo, G. (1967). *Problemas de Ingeniería Química* (Ed. rev.). Recuperado de https://www.u-cursos.cl/usuario/2775c7595e300ed228a801eb8341e457/mi_blog/r/1_PROBLEMAS_DE_ING._QMC_OCON_TOJO_VOL_1.pdf
- Paul, E., Atiemo-Obeng, V., & Kresta, S. (2003). *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice* (Ed. rev.). <https://doi.org/10.1002/0471451452>
- Paz, J. (2014, septiembre). Angulos de Reposo. Recuperado 24 diciembre, 2019, de <https://es.scribd.com/doc/238566345/Angulos-de-Reposo>
- PNUD. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible | PNUD. Recuperado 7 noviembre, 2019, de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Provecuador. (2014). Provecuador, Bandas Transportadoras en Ecuador. Recuperado 9 enero, 2020, de <http://www.provecuador.com.ec/bandas-transportadoras.html>
- Qiong Chen, & Yuanjun Lv, (2008). Design of paper cutter machine. *2008 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design*, , 1–2. <https://doi.org/10.1109/caidcd.2008.4730620>
- Rong Long. (2019). Compresores de aire : Compresor de aire tipo artesano 1/2HP RL-05-36. Recuperado 23 diciembre, 2019, de <https://www.ronglong.com.ec/compresor2/rl-05-36-detail>
- SODECA. (2012). Catálogo general SODECA. Recuperado 17 enero, 2020, de https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/CT11_60Hz_2012ES.pdf
- Teschke, K., & Demers, P. (1998). INDUSTRIA DEL PAPEL Y DE LA PASTA DE PAPEL. *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO*, , 2949–2969. Recuperado de <https://higieneysseguridadlaboralcv.files.wordpress.com/2012/04/oit-enciclopedia-de-salud-y-seguridad-en-el-trabajo.pdf>
- ULMA. (2015). Rodillo. Recuperado de <http://www.ulmaconveyor.com/wp-content/uploads/sites/6/2014/10/RodillosULMA.pdf>
- Wolfgang, I., & Hippolit, F. (2010, 15 febrero). Fieltro para la Fabricación de papel. Recuperado 25 diciembre, 2019, de <https://patentados.com/2010/fieltro-para-la-fabricacion-de-papel>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications* (4ª ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill.

APÉNDICES

APÉNDICE A

