

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la**  
**Producción**

“Diseño de un sistema para extraer fibra de celulosa de los envases  
multicapas para uso alimenticio”

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Álvaro Posada C.

José Pazmiño Y.

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2016

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecemos a Dios por darnos salud y vitalidad para culminar el desarrollo del proyecto de fin de carrera. Agradecemos también a personas externas a nosotros que hicieron posible la recopilación de información y datos muy necesarios para concluir con este trabajo:

Ing. Ignacio Wiesner.

Dr. Ángel Ramírez.

Ing. Juan Lozano.

Ing. Tyron Alcívar.

Dr. Juan Peralta.

Ing. Eduardo Orcés

Todo el personal de INPAECSA que nos facilitó el ingreso a la planta.

Agradecemos a la ESPOL, que nos dotó de vastos conocimientos, indispensables en nuestra formación como futuros ingenieros mecánicos, con los cuales logramos llevar a cabo este proceso y pudimos poner en práctica todo lo aprendido para el diseño de este sistema.

## DEDICATORIA

Yo, José Roberto Pazmiño Yépez, agradezco específicamente a mi madre Judith Yépez Mora, que me ha dado el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera, siempre creyendo en mí y en mis capacidades. También agradezco a mi papá y mis hermanos que hicieron que nunca nada me falte.

Agradezco a la persona que se encuentra a mi lado en estos momentos, Cristina Moscoso Loayza, que siempre ha estado ahí para darme una mano cuando la he necesitado. Y a Dios por sobre todas las cosas.

## **DEDICATORIA**

Yo, Álvaro Posada, dedico este proyecto a mis padres y a mi hermano, ya que siempre estuvieron a mi lado en este difícil trayecto. Fueron y serán una parte fundamental de mi inspiración para lograr mis objetivos.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:


José Roberto Pazmiño Yépez


Álvaro Arnaldo Posada Castro


Msc. Ignacio Wiesner Falconí

Dr. Ángel Ramírez

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

  
Autor 1

  
Autor 2

  
Director

## RESUMEN

En este proyecto se presenta el diseño de un sistema para extracción de fibra de celulosa que también se lo conoce como hidropulper de alta consistencia, el cual permite recuperar la pulpa virgen presente en envases multicapas para uso alimenticio, utilizando agua y el movimiento de un rotor helicoidal. De ser implementado, representa una solución parcial al impacto ambiental producido por la deforestación y la acumulación de envases desechados en alcantarillas, ríos y esteros, ya que se puede obtener pulpa virgen de los envases reciclados y reutilizarla en otros productos como cartón, papel higiénico, servilletas, etc. Además, se pretende fomentar el desarrollo de este tipo de equipos en el país, ya que el reciclaje de dichos envases alcanza un pequeño porcentaje de su producción anual y los equipos utilizados en este tipo de fábricas son importados.

Se requirió hacer varias visitas a plantas como INPAECSA y CARTOPEL, ya que tienen instalados sistemas recicladores de papel y tetrapak, respectivamente, donde se obtuvo la información necesaria para realizar un modelo a escala del hidropulper, utilizando la técnica de análisis dimensional. Además, se utilizó un viscosímetro para cuantificar el comportamiento no newtoniano de la pasta de celulosa al calcular la velocidad angular del rotor y la potencia requerida en el motor.

Se determinó que el hidropulper permitiría obtener 257 kg de pasta de celulosa a una consistencia del 18% en cada ciclo de operación. A su vez, que el rotor helicoidal debería girar a 460 rpm, y se necesitaría una potencia de 28 KW, suministrada por un motor eléctrico.

Se simuló el comportamiento del fluido dentro del hidropulper, observándose que la forma del rotor produciría la turbulencia requerida para generar una mezcla homogénea y así lograr el proceso de separación.

**Palabras clave:** Hidropulper, consistencia, celulosa, rotor helicoidal, pulpa virgen, análisis dimensional, fluido no newtoniano.

## **ABSTRACT**

*This project presents the design of a hidropulper for high consistency of paper pulp, which allows recovering cellulose fibers present in beverage cartons, using water and a helical rotor movement. Being implemented, it represents a partial solution to the environmental impact produced by deforestation and the accumulation of discarded packages in sewers, rivers and estuaries, since it's possible to get virgin pulp from them and reuse it in other products such as cardboard, toilet paper, napkins, etc. In addition, can encourage the development of this type of equipment in Ecuador, since the recycling of this products reaches a small percentage of its annual production and the equipment used in this type of plants are imported.*

*It was required to make several visits to plants such as INPAECSA and CARTOPEL, since they have installed systems for recycle paper and tetrapak, respectively, where the information necessary to make a scale model of a hidropulper was obtained, using the dimensional analysis method. Additionally, a viscometer was used to quantify the non-Newtonian behavior of cellulose paste when calculating the angular velocity of the rotor and the power required in the electric motor.*

*It was determined that the hidropulper could produce 257 kg of cellulose pulp in each operation cycle at a 18% consistency, with the helical rotor moving at 460 rpm and consuming 28 KW.*

*The behavior of the fluid inside the hidropulper was simulated, and was observed that the rotor produced the required turbulence to provide a homogeneous mixture and thus, achieve the separation process.*

**Key words:** *Hidropulper, consistency, cellulose, helical rotor, virgin pulp, dimensional analysis, non-Newtonian fluid.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
<b>1.INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Descripción del problema</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos</b> .....	<b>2</b>
1.2.1. Objetivos Generales.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
<b>1.3. Marco teórico</b> .....	<b>2</b>
1.3.1. Envases multicapas para uso alimenticio.....	2
1.3.2. Reciclaje del tetrabrik en el Ecuador.....	3
1.3.3. Pulpa de papel virgen .....	3
1.3.4. Características y aplicaciones de los componentes reciclados.....	4
1.3.5. Maquinaria para reciclar papel y sus derivados .....	5
<b>2.METODOLOGÍA DE DISEÑO</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Diseño Conceptual</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2. Estrategia de diseño</b> .....	<b>6</b>
2.2.1. Diagrama de flujo de la metodología de diseño. ....	7
<b>2.3. Alternativas de Diseño</b> .....	<b>8</b>
2.3.1. Separador de capas mediante rodillos en serie. ....	8
2.3.2. Hidropulper para Alta Consistencia del papel.....	8
<b>2.4. Selección de la mejor alternativa</b> .....	<b>8</b>
<b>2.5. Diseño detallado</b> .....	<b>9</b>
2.5.1. Fórmulas principales para el diseño del tanque.....	10
2.5.2. Características del fluido según su consistencia. ....	14
2.5.3. Diseño del Árbol del Rotor .....	22
2.5.4. Diseño del tanque.....	29
2.5.5. Selección de cojinetes.....	33
2.5.6. Diseño del sistema de transmisión de movimiento.....	38
2.5.7. Diseño de la sujeción del rotor con el tanque.....	42



<b>3.RESULTADOS</b>	46
<b>3.1. Parámetros de Diseño del Hidropulper</b> .....	46
<b>3.2. Simulación del comportamiento cualitativo del fluido</b> .....	48
<b>3.3. Análisis de costos</b> .....	49
<b>4.DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b>	51
<b>4.1. Conclusiones</b> .....	52
<b>4.2. Recomendaciones</b> .....	53
<b>5.BIBLIOGRAFÍA</b>	52
<b>6.ANEXOS</b>	55

## **ABREVIATURAS**

AISC American Institute of Steel Construction

ASTM American Society for Testing and Materials

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

INPAECSA Industria Papelera Ecuatoriana S.A.

## SIMBOLOGÍA

C	Consistencia
Cp	Centipoise
Cor	Capacidad básica de carga estática
Cr	Capacidad básica de carga dinámica
D	Diámetro
E	Espesor
F	Fuerza
Fc	Factor de carga
Fo	Factor de velocidad
g	Gravedad
$k_f$	Factor de concentración de esfuerzo
Kg	Kilogramo
Kw	Kilowatt
L	Longitud
Lt	Litros
M	Momento flector
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
N	Newton
N	Factor de seguridad
Pa	Pascal
P	Potencia
Pr	Carga radial
r	Radio
R	Reacción
rpm	Revoluciones por minuto
seg	Segundo
$S_e$	Resistencia a la fatiga modificada.
$S_{ut}$	Resistencia ultima a la tensión

T	Torque
V	Velocidad
Vol	Volumen
$\mu$	Viscosidad aparente
$\rho$	Densidad
$\omega$	Velocidad angular
$\sigma$	Esfuerzo normal
$\tau$	Esfuerzo cortante
$L_{10}h$	Tiempo de vida útil del cojinete, en horas

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Matriz de Selección para las 2 alternativas propuestas .....	9
Tabla 2.2. Dimensiones longitudinales del Hidropulper .....	12
Tabla 2.3. Parámetros de operación del hidropulper .....	13
Tabla 2.4. Parámetros de diseño del modelo .....	13
Tabla 2.5. Resultados experimentales de la viscosidad de la pasta de pulpa virgen .....	15
Tabla 2.6. Resultados experimentales de la viscosidad de la pasta de papel bond .....	16
Tabla 2.7. Resultados de potencia y rpm, según otras alternativas de diseño .....	20
Tabla 3.1. Resultados de dimensiones principales del tanque .....	46
Tabla 3.2. Resultados Hélice 1 .....	47
Tabla 3.3. Resultados Hélice 2 .....	47
Tabla 3.4. Dimensiones de las Aspas del Helicoide .....	47
Tabla 3.5. Parámetros de operación del hidropulper .....	47
Tabla 3.6. Precios de adquisición de las diversas partes del equipo .....	49
Tabla 3.7. Costos de montaje del sistema .....	50
Tabla 3.8. Costos de partes móviles de la transmisión del sistema .....	50

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de diseño .....	7
Figura 2.2 Dimensiones representativas para el diseño del sistema .....	13
Figura 2.3 Comportamiento de la viscosidad aparente según la consistencia. ....	14
Figura 2.4 Variación de la viscosidad aparente de la pulpa virgen con respecto a los rpm a 18% de consistencia .....	15
Figura 2.5 Variación de la viscosidad aparente de la pasta de papel bond en función de las rpm del viscosímetro a 18% de consistencia .....	16
Figura 2.6 Perfil de velocidad de un fluido newtoniano en un tanque fijo con un cilindro interior rotando a velocidad constante .....	29
Figura 2.7 Esquema de la carga aplicada a las paredes del tanque y que debe soportar la soldadura a tope .....	33
Figura 2.8 Esquema del árbol del rotor que se va a diseñar .....	34
Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre del árbol .....	34
Figura 2.10 Especificaciones para bandas en V .....	38
Figura 2.11 Factores de servicio tabulados .....	40
Figura 2.12 Factor de corrección $k_2$ debido a la longitud de la banda .....	40
Figura 2.13 Factor de corrección debido al ángulo de contacto, $k_1$ .....	41
Figura 2.14 Potencia permisible de la banda, de acuerdo a la velocidad de trabajo .....	41

Figura 2.15 Esquema de las cargas de tensión aplicada en los pernos .....	42
Figura 2.16 Propiedades geométricas de los pernos .....	44
Figura 2.17 Propiedades mecánicas de los pernos M14.....	45
Figura 3.1 Esquema del helicoide final, detallando las hélices 1 y 27	
Figura 3.2 Zonas de turbulencia generadas por la rotación del helicoide. ....	48
Figura 3.3 Simulación del campo de flujo de velocidad en estado estable .....	49
Figura 6.1 Catálogo de rodamientos rígidos de bolas, resaltando el mecanismo seleccionado.....	55
Figura 6.2 Catálogo de soldadura. ....	55

# CAPITULO 1

## 1.INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción del problema

El consumo de envases multicapas para uso alimenticio en el Ecuador tiene una huella ecológica considerable, ya que actualmente la producción de los mismos alcanza las 7800 toneladas anuales (Diario El Tiempo, 2015), terminando en la mayoría de los casos en depósitos de basura o en las calles. Paralelamente, fabricar un producto de este tipo conlleva a utilizar la pulpa virgen que proviene de los árboles, por lo que también se genera un impacto ambiental debido a la deforestación (Tetra Pak, 2014).

Existen empresas en el país que se dedican a reciclar estos envases para obtener papel, así como a reutilizar el aluminio y el plástico presentes que actúan como capas protectoras de los productos orgánicos, transformando su unión (llamada Poly-Al) principalmente en tejas para techos (Diario El Tiempo, 2015), pero no se aprovecha el verdadero potencial de su tercer componente, la pulpa de papel virgen, ya que se carece de un sistema que permita recuperarla sin dañar sus fibras. Al cumplir con dicha condición, se obtendría un material valioso para la industria papelera, ya que obtener su materia prima ya no tendría el mismo impacto ecológico antes mencionado y se estaría reduciendo considerablemente la tala de árboles y sus efectos colaterales.

## **1.2. Objetivos**

### 1.2.1. Objetivos Generales

- Diseñar un hidropulper para alta consistencia que permita recuperar la pulpa del cartón presente en los envases tetrabrik sin perder su calidad de virgen.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar la simulación del comportamiento del fluido.
- Determinar la potencia requerida para un hidropulper diseñado a escala.
- Calcular la velocidad angular necesaria para llevar a cabo el proceso de separación.

## **1.3. Marco teórico**

### 1.3.1. Envases multicapas para uso alimenticio

Los envases multicapas diseñados, conocidos en el mercado mundial como 'tetrabriks' para conservar las propiedades de los alimentos, sin necesidad de refrigeración, son producidos desde hace ya 56 años por la empresa multinacional Tetrapak (Tetra Pak, 2014), donde generalmente encontramos envasado productos como leche o sus derivados, dándole así a los productos la capacidad de ser transportados hacia destinos lejanos sin la necesidad de constante refrigeración, pudiendo conservar sus propiedades dentro del mismo.

Entre sus componentes principales destaca la llamada pulpa de papel virgen, conocida así debido a que proviene directamente de la madera como materia prima, es decir no ha pasado por un proceso de reciclaje anteriormente, lo que certifica que sus fibras de madera que la componen están intactas y posee un elevado costo por unidad de masa en el mercado mundial. Además, actúa como muy buen aislante térmico y



también es resistente a los golpes que se pueden producir durante la transportación del producto (Tetra Pak, 2014).

Los envases de tetrabrik también se conforman de polietileno y aluminio en porcentajes más bajos, pero cumplen un papel igual de importante, donde el polietileno evita la filtración de líquido a través de las fibras del cartón, y el aluminio actúa como aislante de los rayos solares, no dejando que éstos produzcan reacciones químicas que alteren las propiedades del producto. (Tetra Pak, 2014)

### 1.3.2. Reciclaje del tetrabrik en el Ecuador.

Actualmente la única empresa en nuestro país dedicada al reciclaje de este tipo de envase es Ecuaplastic, la cual inició en el año 2012 con un porcentaje de reciclaje del 5.2% (390 toneladas), enfocándose solamente en el reciclaje del polietileno con el aluminio juntos, usado actualmente para la fabricación de tejas, más económicas y resistentes (Diario El Tiempo, 2015).

Aun no hay datos registrados acerca de una compañía que se dedique a la obtención de la pulpa de papel virgen, siendo el componente principal de los envases tetrabrik ya que el 75% del peso neto de los mismos (Tetra Pak, 2014).

### 1.3.3. Pulpa de papel virgen

La pulpa virgen o pulpa de celulosa es la materia prima necesaria para la mayoría de procesos en los que se requiere fabricar papel. A nivel mundial, esta pulpa proviene en un 89% de árboles como el abedul, pino, picea y eucalipto. El resto, se obtiene de vegetales como el algodón, lino, paja de cereales, caña de azúcar, entre otros. La fibra de celulosa es el material más apropiado para la fabricación de papel, ya que tiene una alta resistencia a la tensión, buena flexibilidad, absorbe aditivos fácilmente, es químicamente estable, entre otros (Textos Científicos, 2005).

Aproximadamente un tercio del total de madera procesada en el mundo se emplea para la fabricación de pulpa, requiriéndose de 2 a 3 toneladas de árboles para producir 1 tonelada de pulpa de papel virgen. Para transformar esta cantidad de árboles en pulpa se necesitan grandes cantidades de agua, energía y varios productos químicos, teniendo como efectos adversos la generación de contaminantes gaseosos, líquidos y residuos sólidos (Green Peace, 2006).

Para producir la pasta o pulpa es necesario separar las fibras de celulosa a través de métodos químicos o métodos mecánicos. Estas fibras están fuertemente unidas por un compuesto llamado lignina, el cual es un adhesivo resinoso que ayuda en la estabilidad estructural a los árboles. Al separar dichos compuestos, debe controlarse que las características iniciales de la celulosa se alteren lo menos posible, ya que de ellas depende la calidad del tipo de papel requerido (Silva, 2015).

El papel que proviene de pasta de celulosa puede ser reciclado de cuatro hasta siete veces, dependiendo del largo de las fibras a reutilizar, ya que dicha longitud disminuye cada vez que se reprocesa (SCA, 2010). Para resolver esto, el papel reciclado se mezcla con papel virgen en proporciones de 3 a 1 para asegurar un papel de calidad adecuada y una cantidad específica de agua. A su vez, se debe considerar la consistencia del mismo, la que se define como el porcentaje de papel presente en la mezcla agua-papel, denominándose baja, media y alta consistencia a los valores aproximados de 3%, 8% y 13%, respectivamente (Paul, 2004).

#### 1.3.4. Características y aplicaciones de los componentes reciclados.

Al separarse el cartón de la unión Plástico-Aluminio, se obtiene una pasta con determinada consistencia que se puede aprovechar en múltiples usos, ya sea por si sola o mezclándose con pulpa virgen, ya que, al ser pulpa reciclada con métodos convencionales, ha perdido su calidad inicial. El plástico y el aluminio se pueden usar para hacer tejas para techo, las

cuales han demostrado tener una mejor calidad que las que son hechas a base de cerámicos, aislando mejor el calor, reduciendo el peso, otorgando mayor flexibilidad y resistencia a las vibraciones (Diario El Tiempo, 2015).

#### 1.3.5. Maquinaria para reciclar papel y sus derivados

Una analogía para entender lo que es un hidropulper, se puede pensar que es una licuadora gigante, pero esta máquina está diseñada con el fin de producir una pasta húmeda formada por papel o cartón más agua, donde un elemento rotatorio central es el encargado de realizar la mezcla, de la cual se obtiene la pulpa de papel o cartón, para un proceso posterior de reciclaje (WILEY-VCH, 2006).

Existen numerosos diseños de hidropulpers, los que tienen sus respectivos elementos rotatorios centrales, que dependiendo de sus características se obtienen distintos tipos de pastas con longitudes de fibra largas o cortas, cada una con su propia consistencia, la cual es especificada por las industrias papeleras de acuerdo a sus requerimientos (kadant, s.f.).

El elemento central rotatorio que se requiere para separar la pulpa virgen es llamado a nivel industrial como Helico-Rotor, ya que se diseñó con álabes de forma helicoidal, no daña las fibras de celulosa y puede trabajar con una consistencia mayor a la de los demás hidropulpers. Éste elemento separa al cartón virgen por medio de fricción debido a su forma helicoidal particular, consiguiendo así una pasta de pulpa de primera calidad. Para cumplir con este objetivo se necesita un tiempo de licuado entre 16 a 20 minutos (kadant, s.f.).

Otras condiciones de diseño a considerar son la velocidad angular del elemento rotativo y la capacidad volumétrica con la que puede trabajar el mecanismo, ya que de ellas dependerá el desempeño de la máquina y la producción de pulpa requerida (WILEY-VCH, 2006).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

### 2.1. Diseño Conceptual

El equipo debe contar con un mecanismo que separe la pulpa de las capas de plástico y del aluminio, sin cortar ni lastimar a la fibra presente en ella. A su vez, debe permitir que la pulpa continúe con su siguiente etapa de procesamiento sin que existan fugas, residuos y con una consistencia mínima determinada.

Se debe considerar que se está trabajando con pulpa de papel, por lo que los materiales de cada componente del sistema en contacto con el fluido deben soportar la alta abrasión que éste produce.

### 2.2. Estrategia de diseño

Se estableció un plan para diseñar el extractor de fibras que cumpla con los requerimientos técnicos mencionados anteriormente. Se definió un diagrama de flujo con todas las etapas de diseño a seguir, mostrado en la sección 2.2.1, reconociendo la relación entre cada una y las retroalimentaciones necesarias.

2.2.1. Representación gráfica de la metodología de diseño

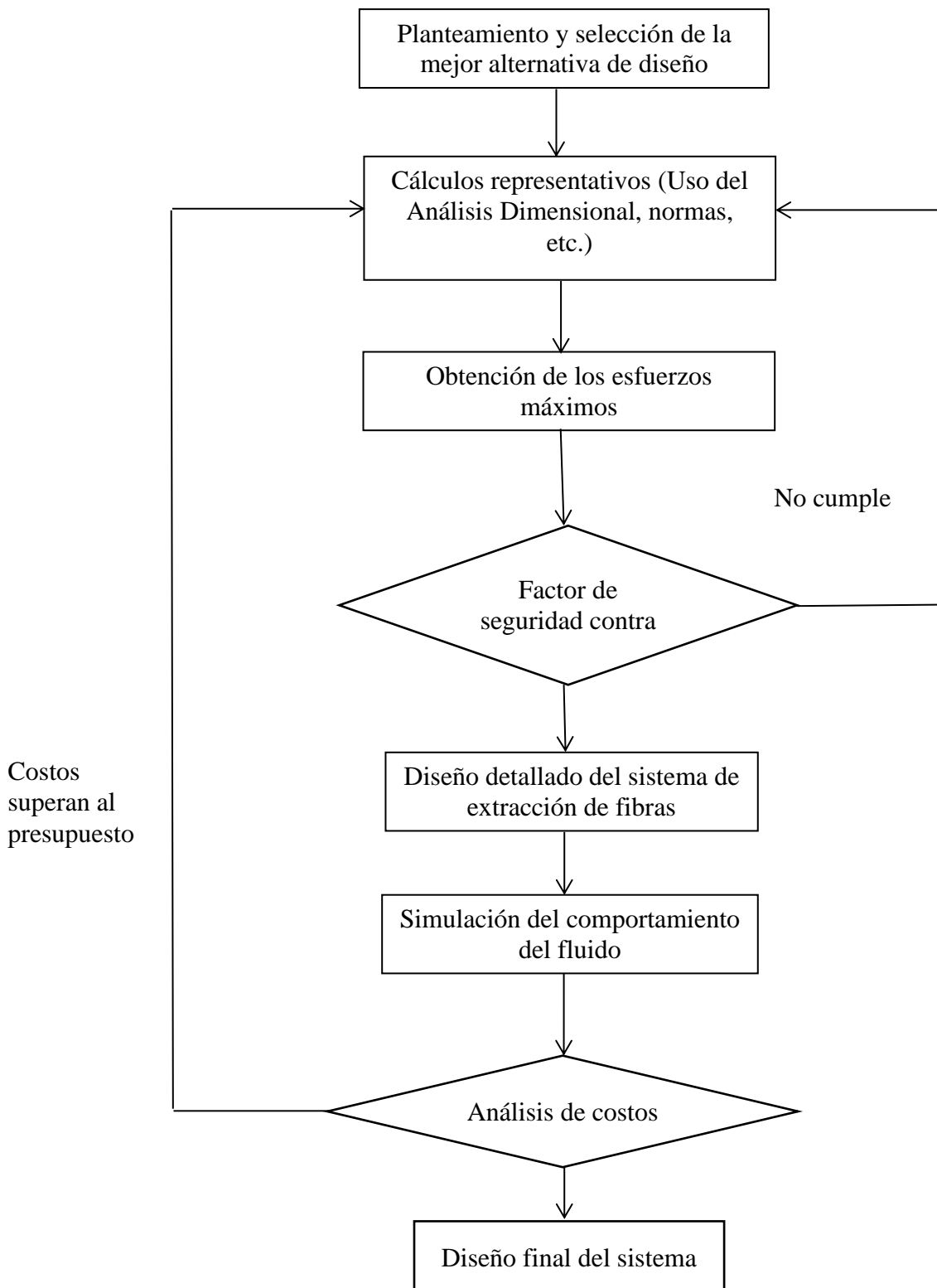


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de diseño

Fuente (Autoría propia, 2015)

## **2.3. Alternativas de Diseño**

### **2.3.1. Separador de capas mediante rodillos en serie.**

Consiste en un sistema continuo de rodillos alineados verticalmente, con el fin de que los envases se friccionen entre sí, y de esta forma se separe la pulpa de los demás componentes. El sistema cuenta con una bomba, la cual reingresa los envases que todavía contienen fibras el número de veces que sea necesario, hasta completar la extracción completa de la pulpa.

### **2.3.2. Hidropulper para Alta Consistencia del papel**

Este sistema consiste en un rotor helicoidal y un tanque para agua de una determinada capacidad, en el que, por medio del rozamiento entre el helicoide y los envases, se separa el cartón de los otros componentes del Tetrabrik.

## **2.4. Selección de la mejor alternativa**

Para determinar la solución más adecuada para cumplir con los requerimientos planteados anteriormente, se procedió a elaborar una Matriz de Decisión para las dos alternativas, que considera varios aspectos de viabilidad con sus respectivos porcentajes de importancia para desarrollar este proyecto, los cuales se detallan a continuación:

- Viabilidad Técnica: Facilidad en el diseño
- Costo de fabricación
- Facilidad de Mantenimiento
- Facilidad de Montaje
- Consumo Energético
- Limitaciones Físicas

Para cada solución y parámetro, se calificó con un valor del 1 al 10, teniendo como resultado una alternativa con un mayor puntaje, la cual se elegirá como el camino más viable para proseguir con el diseño.

**Tabla 2.1. Matriz de Selección para las 2 alternativas propuestas**

<b>Solución</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Viabilidad</b>	<b>Hidropulper</b>	<b>Sistema de Rodillos en serie</b>
<b>Viabilidad Técnica: Facilidad en el diseño (25%)</b>	8	7
<b>Costo de fabricación (20%)</b>	7	6
<b>Facilidad de Mantenimiento (20%)</b>	9	7
<b>Facilidad de Montaje (15%)</b>	8	6
<b>Consumo Energético (15%)</b>	8	8
<b>Limitaciones Físicas (5%)</b>	10	9
<b>Total</b>	8.05	6.80

La tabla 2.1 muestra a la alternativa A como mejor solución, por lo que se continuará con las siguientes etapas del proceso de diseño.

## **2.5. Diseño detallado**

El diseño del Hidropulper se basó en aspectos como la longitud y calidad de las fibras requeridas, producción diaria de pulpa, la consistencia de la pasta de papel, el material del elemento rotatorio y su respectivo tanque, entre otros. Esta máquina también debe producir fuerzas hidráulicas

suficientes para conseguir que la pulpa presente en los envases se separe del plástico y aluminio, y a su vez, que ésta forme una mezcla relativamente homogénea con el agua.

Se ha investigado y obtenido que para altas consistencias (mayores que 18%), se requiere que exista un área de contacto más grande entre el rotor y el fluido, así como una mayor turbulencia y un tiempo de mezclado más lento respecto a modelos de rotores que permiten obtener pasta de baja o mediana consistencia. Esto se logra con un diseño de rotor helicoidal, el cual puede ser totalmente cónico o componerse de una hélice circular en la parte superior y luego, tener el comportamiento de una hélice cónica.

En ambos casos, se debe seleccionar un aspa de área de sección transversal que permita desarrollar el flujo adecuado, el número de aspas en el rotor, paso de la hélice y su respectivo ángulo de abertura o de conicidad

Se presentan los pasos a seguir para llegar al diseño completo de este sistema:

- Diseño del rotor helicoidal para obtener papel de alta consistencia a la producción determinada.
- Diseño del tanque o criba en que ingresará el flujo de agua y las pacas de envases tetrabrik.
- Determinación de la potencia necesaria para operar el sistema.
- Selección del sistema de transmisión de potencia.

Cabe recalcar que el diseño detallado no incluye la obra civil.

#### 2.5.1. Fórmulas principales para el diseño del tanque.

Se tomó como referencia el hidropulper que se encuentra operando en la ciudad de Babahoyo, más la ayuda de un catálogo de una industria



fabricante de hidropulpers. Luego, se utilizaron las fórmulas obtenidas mediante el Análisis Dimensional, la cual es una herramienta útil en áreas como la Mecánica de Fluidos y experimentación con modelos a escala

Se asumió que la potencia necesaria del motor para hacer girar al helicoide depende de las variables mostradas en la ecuación 2.1 (Schuring, 1977):

$$P = (A, B, C, D, d_{max}, C, \omega, \rho, \mu) \quad Ec(2.1)$$

Donde  $d_{max}$  es el diámetro máximo del helicoide, C es la consistencia en términos de porcentaje,  $\omega$  es la velocidad de giro del rotor helicoidal,  $\rho$  es la densidad de la mezcla tetrapak-agua a la consistencia requerida y B, C, D dependen de A (diámetro del tanque), por lo que la expresión se puede reducir a (Schuring, 1977):

$$P = (A, d_{max}, c\%, \omega, \rho, \mu) \quad Ec(2.2)$$

Al aplicar el análisis dimensional, (considerando que existen 6 variables en total y 3 dimensiones independientes: L, T y M), obtenemos los siguientes términos  $\Pi$  (Schuring, 1977):

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho \omega^3 d_{max}^5} \quad Ec(2.3); \quad \pi_2 = \frac{A}{d_{max}} \quad Ec(2.4)$$

$$\pi_3 = c\% \quad Ec(2.5); \quad \pi_4 = \frac{\rho \omega d_{max}^2}{\mu_a} \quad Ec(2.6)$$

Siendo  $\pi_4$  la representación del Número de Reynolds para un fluido en rotación y  $\mu_a$  es la viscosidad aparente del fluido, la cual se detallará más adelante. A partir de las reglas de similitud geométrica, cinemática y dinámica, se obtiene (Schuring, 1977):

$$A_2 = \frac{d_2}{d_1} A_1 \quad Ec(2.7)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\rho_{m1}}{\rho_{m2}} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right) \quad Ec(2.8)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 \quad Ec(2.9)$$

$$\frac{c_2(\%)}{c_1(\%)} = k \quad Ec(2.10)$$

Donde k es una constante que puede ser igual a 1 en el caso de que se requiera trabajar a la misma consistencia.

Para realizar el dimensionamiento del modelo a una escala de reducción definida, se debe considerar todos los datos tomados del hidropulper instalado en INPAECSA, los cuales se detallan a continuación en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2. Dimensiones longitudinales del Hidropulper**

Dimensiones	A	B	C	D	Altura Helicoide	Diámetro máximo
(mm)	3200	1300	2700	4000	1400	1100

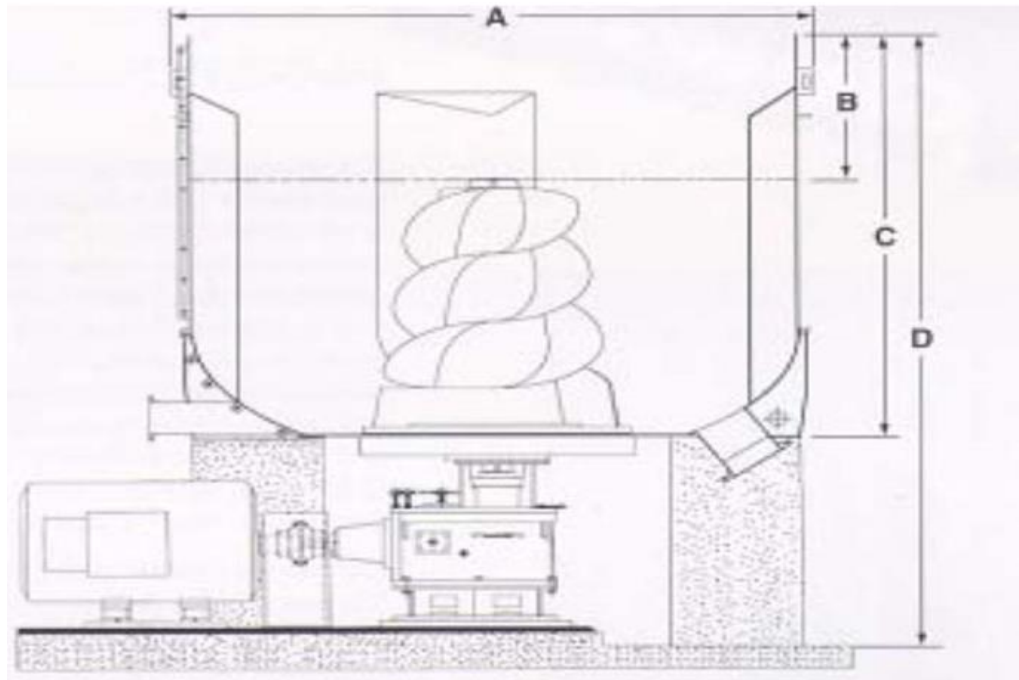


Figura 2.2 Dimensiones representativas para el diseño del sistema. (kadant, s.f.)

Tabla 2.3. Parámetros de operación del hidropulper

Velocidad Angular (RPM)	Potencia(KW)	Consistencia (%)	Capacidad (m³)
160	200	18	12

Se decidió diseñar un modelo a escala, considerando que el helicoides tenga una altura de H=500mm, por lo que el factor de reducción sería:

$$\frac{H1}{H2} = \frac{1400mm}{500mm} = 1:2.8$$

Las dimensiones principales del modelo se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2.3. Parámetros de diseño del modelo

Dimensiones (mm)	A	B	C	D	Altura Helicoide	Dmax
	1143	465	965	1429	500	393

La pulpa de papel es un fluido No Newtoniano de tipo Pseudoplástico, el cual se modela con la "Ley de Potencia".

$$\tau = \mu_a \gamma^n \quad Ec(2.11)$$

Siendo  $\gamma$  la velocidad de deformación o razón de corte (1/seg) y, además:

$$\mu_a = k\mu^{n-1} \quad Ec(2.12)$$

Donde K y n permiten describir el comportamiento del fluido No Newtoniano. (Paul, 2004)

### 2.5.2. Características del fluido según su consistencia.

En la figura 2 se muestra el comportamiento de la viscosidad aparente, de un fluido no newtoniano como la pulpa, a diferentes consistencias, según la investigación realizada por Moseley (2012) , pero no detalla la que se necesita para este proyecto, por lo cual, fue necesaria la experimentación y medición de la viscosidad, al 18% de consistencia.

Apparent Viscosity Data for different types of paper pulp and consistencies.

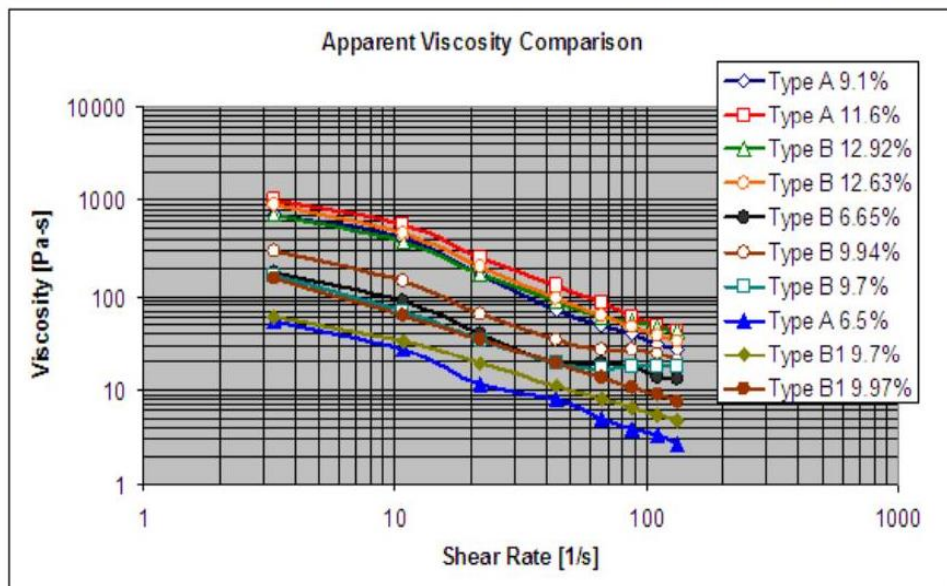


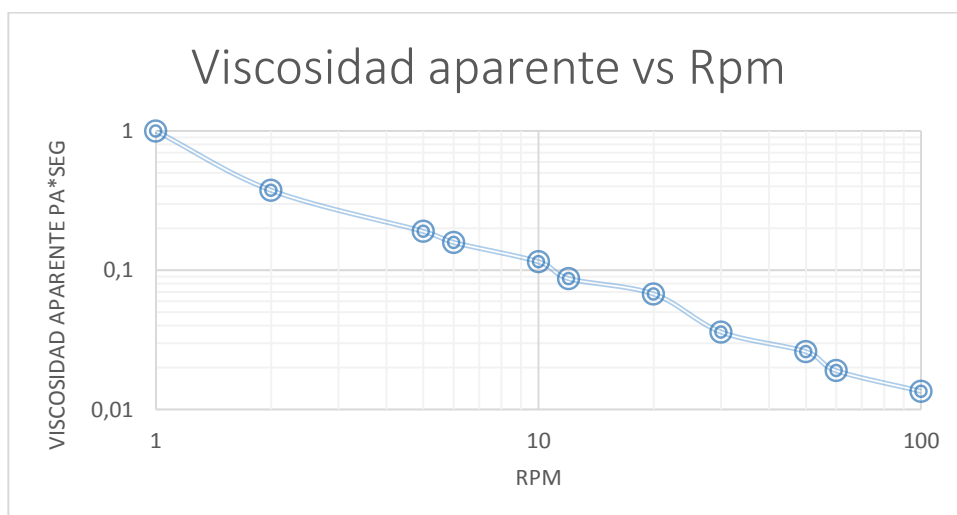
Figura 2.3 Comportamiento de la viscosidad aparente según la consistencia.

Fuente (Moseley, 2012)

Se obtuvieron datos experimentales de la viscosidad aparente de la pulpa virgen y también de papel bond, a diferentes rpm, ya que a ser un fluido no newtoniano era necesario observar su comportamiento y medir su viscosidad a condiciones distintas de trabajo, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 2.5.

**Tabla 2.4. Resultados experimentales de la viscosidad de la pasta de pulpa virgen**

Tetrapak		
rpm	Cp	Pa.sec
1	1000	1
2	375	0,375
5	190	0,19
6	158,3	0,1583
10	115	0,115
12	87	0,087
20	67,5	0,0675
30	36	0,036
50	26	0,026
60	19	0,019
100	13,5	0,0135

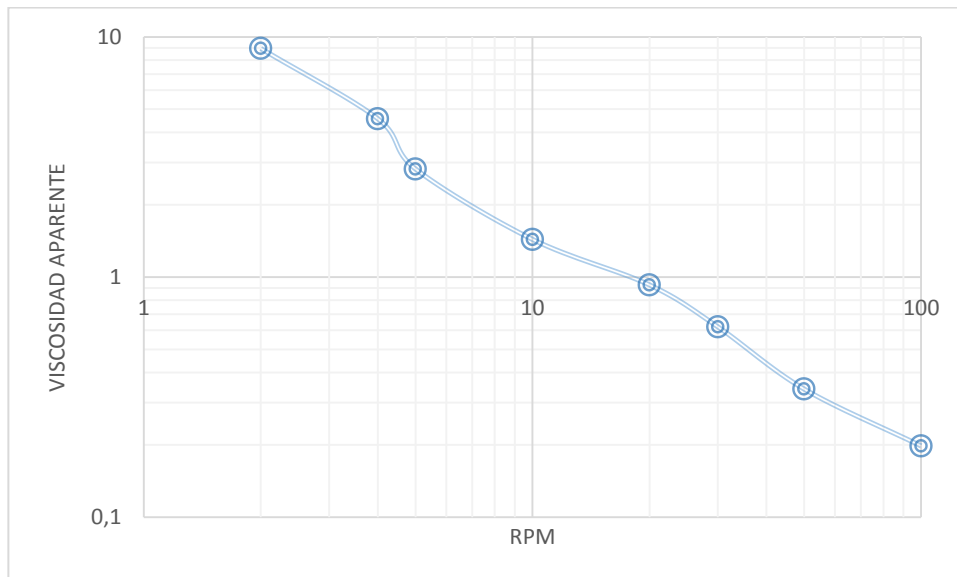


**Figura 2.4 Variación de la viscosidad aparente de la pulpa virgen con respecto a los rpm a 18% de consistencia.**

**Fuente (Autoría propia, 2015)**

**Tabla 2.5. Resultados experimentales de la viscosidad de la pasta de papel bond**

Papel Bond		
rpm	cp	Pa seg
2	8950	8,95
4	4562,5	4,5625
5	2820	2,82
10	1435	1,435
20	927,5	0,9275
30	620	0,62
50	341,5	0,3415
100	198	0,198



**Figura 2.5 Variación de la viscosidad aparente de la pasta de papel bond en función de las rpm del viscosímetro a 18% de consistencia**

**Fuente (Autoría propia, 2015)**

Se aproximó la ecuación que describe el comportamiento de la viscosidad aparente de cada fluido en función del rpm, que se muestra en las gráficas 1 y 2, obteniéndose las siguientes ecuaciones.

$$\mu_{papel} = 13.18\omega^{-0.786} \quad Ec(2.13)$$

$$\mu_{tetrap} = 44.55\omega^{-0.669} \quad Ec(2.14)$$

Con estos datos, se procede a calcular los parámetros de operación del modelo a escala que se va a simular.

La densidad de la mezcla de papel bond con agua a la consistencia dada se calcula de la siguiente manera (WILEY-VCH, 2006):

$$\rho_{m1} = C(\rho_{papel}) + (1 - C)\rho_{agua} \quad Ec(2.15)$$

$$\rho_{m1} = 0.18(750) + (1 - 0.18)1000$$

$$\rho_{m1} = 955 \frac{kg}{m^3}$$

Datos característicos de los envases tetrabrik de 1 litro (Yabar, 2010)

Dimensiones:

$$62 \times 91 \times 193(\text{mm}) = 1090 \text{cm}^3$$

$$\text{Masa del envase} = 28 \text{g}$$

$$\text{Volumen neto del envase} = 90 \text{cm}^3$$

Por lo tanto, la densidad del envase es:

$$\rho = \frac{28 \text{g}}{90 \text{cm}^3}$$

$$\rho = 311 \frac{kg}{m^3}$$

Por consiguiente, la densidad de la mezcla de papel bond con agua a la consistencia es (WILEY-VCH, 2006):

$$\rho_{m2} = C(\rho_{envase}) + (1 - C)\rho_{agua} \quad Ec(2.16)$$

$$\rho_{m2} = 0.18(311) + (1 - 0.18)1000$$

$$\rho_{m2} = 876 \frac{kg}{m^3}$$

Con estos datos experimentales se pueden determinar los parámetros necesarios para el diseño del hidropulper, teniendo en cuenta que la información que respalda los cálculos fue tomada de una de estas máquinas que trabaja con papel en la ciudad de Babahoyo. Por lo tanto, primero se calculó la información necesaria para el modelado a escala que trabajaría con pasta de papel bond.

De la ecuación 2.13 que se obtuvo de la viscosidad, se puede obtener que:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = (7.84) \frac{13.18\omega_2^{-0.786}}{13.18\omega_1^{-0.786}}$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 3.17$$

$$\omega_2 = 510 \text{ rpm}$$

De la ecuación (2.9):

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_{m1}}{\rho_{m2}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 0.185$$

$$P_2 = 37 \text{ kw}$$



Se realiza el mismo procedimiento para el hidropulper de cartón, con los datos obtenidos gracias a las compañías visitadas, Ecuación 2.14.

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = (7.84) \frac{44.55\omega_2^{-0.938}}{44.55\omega_1^{-0.938}}$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 2.87$$

$$\omega_2 = 460 \text{ rpm}$$

Y utilizando la ecuación (2.9)

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_{m1}}{\rho_{m2}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 0.14$$

$$P_2 = 28 \text{ kw}$$

También se procedió a verificar que el diseño utilizado en la empresa INPAECSA también puede servir para reciclar envases multicapas, ya que eso fue manifestado por el personal a cargo de la planta de dicha compañía, de lo cual se estimó lo siguiente con la ecuación 2.8

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\rho_{m1}}{\rho_{m2}} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{955}{876} (2.8)^2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 8.55 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 8.55 \frac{1525.8\omega_2^{-0.669}}{7403.47(160)^{-0.786}}$$

$$\omega_2 = 340rpm$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_{m1}}{\rho_{m2}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 \quad Ec(2.9)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{876}{955} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 0.05$$

$$P_2 = 11kw$$

Se probó varias alternativas para definir cuál sería la potencia adecuada del equipo, y su velocidad rotacional, haciendo el cálculo a diferentes escalas de reducción, y distintas consistencias, obteniendo los siguientes resultados en la tabla 2.7.

**Tabla 2.6. Resultados de potencia y rpm, a diferentes escalas y consistencias.**

Consistencia	Escala	Potencia	rpm
18%	1:3.5	40KW	540
	1:2	62KW	320
15%	1:2.8	47KW	380
	1:2	58KW	340

Otra forma para hallar la velocidad angular, es asumir que la razón de corte es directamente proporcional a la velocidad del rotor(Paul, 2004).

De la ecuación 2.8 se obtiene la siguiente expresión:

$$\omega_2 = \frac{955}{876} \left( \frac{\mu_{a2}}{\mu_{a1}} \right) (2.8)^2 \omega_1$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 8.33 \frac{\mu_{a2}}{\mu_{a1}}$$

De la ecuación 2.11 que describe al fluido no newtoniano se obtiene:

$$\frac{\mu_{a2}}{\mu_{a1}} = \left( \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^{n-1} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^{n-1}$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 8.33 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^{n-1}$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 4.86$$

$$\omega_2 = 780 \text{rpm}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}} \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^3 \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^5$$

$$P_2 = \frac{876}{955} \left( \frac{780}{160} \right)^3 \left( \frac{393}{1100} \right)^5 200 \text{kw}$$

$$P_2 = 124 \text{kw}$$

Debido a que el supuesto de que la razón de corte es proporcional a la velocidad del rotor sobredimensiona los valores requeridos de velocidad angular y de potencia en el motor, no se tomaron en cuenta estos resultados en el diseño del sistema.

Se procede a realizar una estimación de la producción diaria de pasta de pulpa.

$$\text{Capacidad volumétrica del tanque} = \frac{12m^3}{2.8^3}$$

$$\text{Capacidad volumétrica del tanque} = 540lt$$

$$\text{Volumen de agua requerido para la mezcla} = \frac{7.3m^3}{2.8^3} = 332lt$$

$$\text{Masa de envases tetrapak requerida} = \frac{0.18(332)}{0.82} = 72.88Kg$$

Teniendo en cuenta que los envases son 75% pulpa virgen, la masa de pulpa que se obtendría por cada ciclo de operación del hidropulper, asumiendo que no hay pérdidas sería:

$$\text{Masa de pulpa} = 72.88(kg) * 0.75$$

$$\text{Masa de pulpa} = 54.66kg$$

### 2.5.3. Diseño del Árbol del Rotor

Para diseñar este elemento, se consideró el torque necesario para mover el rotor, la fuerza axial de compresión que debe soportar debido al peso del rotor y del agua, así como el posible momento flector que se genera por la acción de dicha fuerza. Al ser cargas fluctuantes, se realizaron los cálculos en base al criterio de falla de Goodman, el cual permite hallar el factor de seguridad contra la fatiga del elemento mecánico. Dicho procedimiento se detalla a continuación. (Budynas R. G., 2008)

$$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N} \quad Ec(2.17)$$

Donde  $\sigma'_a$  y  $\sigma'_m$  son los esfuerzos máximos alternantes y medios, respectivamente,  $S_e$  es el valor de la resistencia a la fatiga modificada,  $S_{ut}$  es la resistencia última a la tensión del material del árbol y  $N$  es el factor de seguridad contra la fatiga (Budynas R. G., 2008).

Fuerzas y momentos aplicados al eje.

$$T_{nominal} = \frac{P}{\omega} \quad Ec(2.18)$$

$$T_{nominal} = \frac{28000 \text{ W}}{460 \text{ rpm} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}}}$$

$$T_{nominal} = 581,6 \text{ N.m}$$

Debido a que esta máquina requiere un mayor torque al inicio de la operación para vencer la inercia, se la estima considerando que tiene un pico del 130% de su valor nominal (Bavaresco), por lo que su valor máximo sería:

$$T_{max} = 1,3 * 581,6 = 755,64 \text{ N.m}$$

La fuerza axial constante a la que está sometido el árbol es una fracción de la suma del peso del rotor con el peso del agua sobre el mismo.

$$F_{axial} = 1205.4 \text{ N}$$

Se estima que existe un momento  $M=40 \text{ N.m}$  respecto al plano longitudinal del árbol, causado por el flujo transiente que se genera por la mezcla agua-pulpa-aluminio-polietileno (Budynas R. G., 2008). Entonces:

$$M_{max} = 10 \text{ N.m}$$

$$M_{min} = 0 \text{ N.m}$$

$$M_{\text{alternante}} = \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{2} \quad \text{Ec(2.19)}$$

$$M_{\text{alternante}} = \frac{10 - 0}{2} = 5 \text{ N.m}$$

$$M_{\text{medio}} = \frac{10 + 0}{2} = 5 \text{ N.m}$$

Para el caso de torques externos se tiene (Budynas R. G., 2008):

$$T_{\text{alternante}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{2} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{nominal}}}{2} \quad \text{Ec(2.20)}$$

$$T_{\text{alternante}} = \frac{755,64 - 581,6}{2} = 87,19 \text{ N.m}$$

$$T_{\text{medio}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{nominal}}}{2} = \frac{755,64 + 581,6}{2}$$

$$T_{\text{medio}} = 668,45 \text{ N.m}$$

Esfuerzos alternantes y medios (Budynas R. G., 2008):

Normales:

$$\sigma_a = k_{f_{\text{flexión}}} \frac{M_{\text{alternante}C}}{I} + k_{f_{\text{axial}}} \frac{F_{\text{axial alternante}}}{A} \quad \text{Ec(2.21)}$$

$$\sigma_m = k_{f_{\text{flexión}}} \frac{M_{\text{medio}C}}{I} + k_{f_{\text{axial}}} \frac{F_{\text{axial medio}}}{A} \quad \text{Ec(2.22)}$$

Cortantes:

$$\tau_a = k_{f_{\text{torsión}}} \frac{T_{\text{alternante}D}}{2J} \quad \text{Ec(2.23)}$$

$$\tau_m = k_{f_{torsión}} \frac{T_{medio} D}{2J} \quad Ec(2.24)$$

Debido a que no se tiene totalmente definida la geometría del árbol, se asume inicialmente que es un cilindro sólido de 40 mm de diámetro y los factores de concentración de esfuerzo por fatiga  $k_{f_{torsión}}$ ,  $k_{f_{flexión}}$  y  $k_{f_{axial}}$  son igual a 1. A su vez, se eligió como material el acero inoxidable 304 L, debido a que el rotor está hecho del mismo material y se tiene un ambiente corrosivo. Reemplazando estos valores en las ecuaciones 2.21, 2.22, 2.23, 2.24 se obtiene (Budynas R. G., 2008):

$$\sigma_a = (1) \frac{5N \cdot m \left(\frac{0.040}{2}\right) m}{\frac{\pi}{64} (0.040^4) m^4} + 0$$

$$\sigma_a = 1.59 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = (1) \frac{5N \cdot m \left(\frac{0.040}{2}\right) m}{\frac{\pi}{64} (0.040^4) m^4} + (1) \frac{1205.4N}{\frac{\pi}{4} (0.040^2)}$$

$$\sigma_m = 2.55 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = (1) \frac{87,19 \text{ N} \cdot m \left(\frac{0.04}{2}\right) m}{\frac{\pi}{32} (0.040^4) m^4} = 16.94 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = (1) \frac{668.45 \text{ N} \cdot m \left(\frac{0.040}{2}\right) m}{\frac{\pi}{32} (0.040^4) m^4} = 63.19 \text{ MPa}$$

Utilizando las ecuaciones 2.25 y 2.26, se obtienen los esfuerzos s equivalentes de Von Mises: (Budynas R. G., 2008)

$$\sigma_a' = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} \quad Ec(2.25)$$

$$\sigma_a' = \sqrt{(1.59)^2 + 3(16.94)^2}$$

$$\sigma_a' = 29.34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m' = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad Ec(2.26)$$

$$\sigma_m' = \sqrt{(2.55)^2 + 3(63.19)^2}$$

$$\sigma_m' = 109.47 \text{ MPa}$$

Para hallar  $S_e$ , se deben calcular los siguientes factores modificadores de la resistencia a la fatiga  $S_e'$ : (Budynas R. G., 2008)

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \quad Ec(2.27)$$

Donde  $S_e' = 0.5S_{ut} = 310 \text{ MPa}$  (Budynas R. G., 2008)

$$k_a = A S_{ut}^m \quad Ec(2.28)$$

El factor de carga de superficie se obtiene de la ecuación 2.28, donde A y m para una superficie maquinada son:  $A = 4,51 \text{ MPa}^m, m = -0,265$  (Budynas R. G., 2008)

$$k_a = 4.51 (620)^{-0,265}$$

$$k_a = 0.82$$

Factor de tamaño para un árbol rotatorio de diámetro exterior de 45mm y 10mm de espesor  $k_b$  se obtiene de la ecuación 2.29: (Budynas R. G., 2008)



$$k_b = 1.24 (d)^{-0.107} = 0.835$$

$$k_b = 1.24 (40)^{-0.107} = 0.835$$

$$k_b = 0.835$$

Al trabajar con este procedimiento, los factores de concentración de esfuerzos, son equivalentes a  $k_c = k_d = k_e = 1$ , para el acero inoxidable,  $S_{ut} = 620 MPa$ , por lo que, al reemplazar en la ecuación 2.27 se obtiene (Budynas R. G., 2008):

$$S_e = 0.82 * 0.835 * 1 * 1 * 1 * (0.5 * 620 MPa)$$

$$S_e = 212,60$$

Finalmente, se reemplazan los datos en la ecuación 2.17| factor de seguridad contra la fatiga es

$$\frac{29.35}{212,60} + \frac{109.47}{620} = \frac{1}{N} \quad Ec(2.29)$$

$$N = 3.18$$

También se debe verificar que el elemento no falle por fluencia, usando la siguiente fórmula. (Budynas R. G., 2008).

$$\sigma'_{max} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)^2 + 3(\tau_a + \tau_m)^2} \quad Ec(2.30)$$

$$\sigma'_{max} = \sqrt{(1.59 + 2.55)^2 + 3(16.94 + 63.19)^2}$$

$$\sigma'_{max} = 138.8 MPa$$

Por lo que se obtiene:

$$n_{fluencia} = \frac{310}{138.8}$$

$$n_{fluencia} = 2.23$$

Se debe hallar la frecuencia natural del árbol, ya que no se debe realizar el proceso a esta velocidad angular crítica para evitar el fenómeno de resonancia, con la ecuación 2.31. (Budynas R. G., 2008)

$$\omega_{critica} = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{gEI}{A\gamma}} \quad Ec(2.31)$$

Donde, E es el módulo de Young del material del árbol: 200GPa,  $\gamma$  es el peso específico del acero AISI 304L: 78400 N/m<sup>3</sup>, l es la longitud del árbol: 0.50m y finalmente reemplazando en la ecuación 2.31

$$\omega_{critica} = \left(\frac{\pi}{0.50m}\right)^2 \sqrt{\frac{9.8 \text{ m/seg}^2 (200GPa) 0.04^2}{78400 \text{ N/m}^3 \cdot 16}}$$

$$\omega_{critica} = 1974 \text{ rad/seg}$$

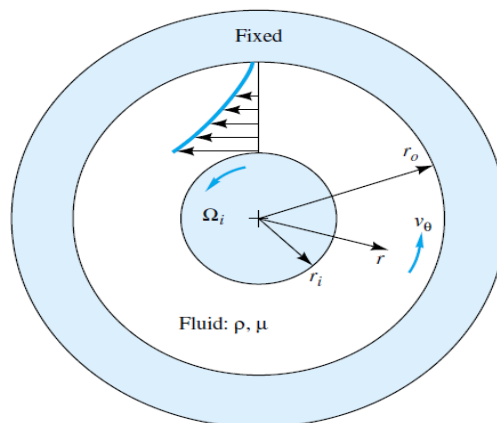
La velocidad angular de operación que se usará es de 400rpm. Como 48.17 rad/seg (460 rpm) es mucho menor a la  $\omega_{critica}$ , no hay peligro de que ocurra la resonancia.

#### 2.5.4. Diseño del tanque.

Gracias al factor de escala 2.8 respecto al hidropulper de Babahoyo, la geometría del tanque se encuentra definida. Sin embargo, se debe demostrar que el espesor del tanque obtenido del análisis dimensional  $e = 3 \text{ mm}$  es suficiente para soportar los esfuerzos que ejerce la mezcla sobre las paredes del tanque. Para poder estimar este efecto, se utilizó un modelo matemático simplificado para cuantificar el movimiento del rotor helicoidal en el centro del tanque, el cual consiste en analizar el comportamiento del flujo y el campo de presión generado por la rotación constante de un cilindro recto dentro de un tanque estático. Fig.3.

Asumiendo que el flujo es bidimensional, incompresible y la mezcla agua-aluminio-polietileno-pulpa se comporta como un fluido newtoniano a altas velocidades, utilizamos la ecuación 2.32 para representar el perfil de velocidad en la dirección  $\theta$ , la cual depende únicamente de la variable  $r$  (distancia desde el centro del cilindro hasta la partícula a analizar. (White, 2008)

$$V_{\theta} = \frac{\omega r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \left( \frac{r_o^2 - r^2}{r} \right) \quad Ec(2.32)$$



**Figura 2.6 Perfil de velocidad de un fluido newtoniano en un tanque fijo con un cilindro interior rotando a velocidad constante**

**Fuente: (White, 2008)**

Donde  $\omega$  es la velocidad de rotación del cilindro interior,  $r_i$  y  $r_o$  son el radio interior de dicho cilindro y el del tanque, respectivamente (White, 2008).

De las ecuaciones de Navier-Stokes de conservación de momento lineal en el eje radial y en el eje Z, se tiene la ecuación 2.33 que representa el campo de presión en la región entre el rotor y el tanque (Morrison, 2011):

$$P_{abs} = \rho \left( \frac{\omega r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \right)^2 \left( -\frac{r_o^4}{2r^2} - 2r_o^2 \ln(r) + \frac{r^2}{2} \right) - \gamma z + C \quad Ec(2.33)$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico del fluido y la constante C se encuentra al reconocer que el tanque está abierto a la atmósfera, por lo que la condición de frontera sería (Morrison, 2011):

$$P_{abs}(z = 0, r = r_i) = P_o$$

Luego:

$$C = P_o - \rho \left( \frac{\omega r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \right)^2 \left( \frac{r_i^4 - r_o^4}{2r_i^2} - 2r_o^2 \ln(r_i) \right) \quad Ec(2.34)$$

Al reemplazar en la ecuación 2.33, se obtiene la ecuación 2.35.

$$P_{man} = \rho \frac{\omega r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \left[ \left( \frac{r^4 - r_i^4}{2r^2} - \frac{r_o^4 - r_i^4}{2r_i^2} \right) + 2r_o^2 \ln\left(\frac{r_i}{r}\right) \right] - \gamma z; \quad r_i \leq r \leq r_o$$

*Ec(2.35)*

Reemplazando datos en la ecuación 2.34:

$$P_{man} = 40348.56 \left[ 0.5r^2 - \frac{0.05}{r^2} - 1.14 \ln(r) - 0.53 \right] - \gamma z; \quad r_i \leq r \leq r_o$$

Debido a la forma del tanque, se estima que la presión máxima ocurre en  $z = -0.5m$  y  $r = r_o = 0.57m$ , y se reemplazan valores en la ecuación 2.35:

$$P_{man} = 40348.56 \left[ 0.5(0.57)^2 - \frac{0.05}{0.57^2} - 1.14 \ln(0.57) - 0.53 \right] + 8584.8(0.5)$$

$$P_{man} = 10.3 \text{ KPa}$$

Ahora se verificará si el tanque se puede modelar como un recipiente de pared delgada, ya que el espesor obtenido del análisis dimensional es de 3mm. Para que se pueda usar esta aproximación, se debe cumplir que  $e \leq 0.05r$  (Budynas).

$$e = 0.05 * 0.57m = 0.029m$$

$$e = 29mm$$

Por lo que el espesor de 3mm cumple con esta condición. Para un recipiente de paredes delgadas, abierto a la atmósfera y con un fluido en rotación dentro de él, existe un esfuerzo cortante en la pared del tanque, debido a la viscosidad de la mezcla y un esfuerzo normal tangencial, debido a la presión. Se considera que el flujo está en estado estable, por lo que estos esfuerzos se consideran constantes. Esto quiere decir que el tanque se diseñará con un criterio de falla por carga estática, como se muestra a continuación en la ecuación 2.36 y 2.37: (Budynas R. G., 2008)

$$\sigma_t = \frac{p_{max} r_o}{e}$$

$$\sigma_t = \frac{10300Pa (0.57m)}{(0.003)}$$

$$\sigma_t = 2.71 \text{ MPa}$$

$$\tau_{pared} = -\mu_a \frac{dV_\theta}{dr} \Big|_{r=r_o} \quad Ec(2.36)$$

Donde  $\mu_a = 44.55(460 \text{ rpm})^{-0.90} = 0.18 \text{ Pa seg}$ . Luego reemplazando se o tiene la ecuación 2.36: (White, 2008)

$$\tau_{pared} = -\mu_a \frac{\omega r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \left( -\frac{r_o^2}{r_o^2} - 1 \right) \quad Ec(2.37)$$

$$\tau_{pared} = 2.44 \text{ Pa}$$

Este esfuerzo es muy bajo en comparación al esfuerzo tangencial, por lo que su aporte en la ecuación del esfuerzo máximo de Von Mises es insignificante (Budynas R. G., 2008),. Entonces, se cumple que:

$$\sigma' = \sigma_t = 2.71 \text{ MPa}$$

Se calcula el factor de seguridad para falla por fluencia: (Budynas R. G., 2008)

$$n_{fluencia} = \frac{S_y}{\sigma'} \quad Ec(2.38)$$

$$n_{fluencia} = \frac{310 \text{ MPa}}{2.71 \text{ MPa}}$$

$$n_{fluencia} = 114.4$$

Se considera que el tanque sería construido con planchas de acero inoxidable 304L, roladas apropiadamente y soldadas a tope con electrodos E308L (Budynas R. G., 2008), ya que este material de aporte es el indicado para soldar con este tipo de acero inoxidable. Se procede a comprobar esta hipótesis con el catálogo (INDURA, 2015), que se muestra en anexos, fig.20:

Datos:

Garganta= espesor del tanque= 3mm

$$S_{ut} = 521 \text{ MPa}$$

$$S_y = 425 \text{ MPa}$$

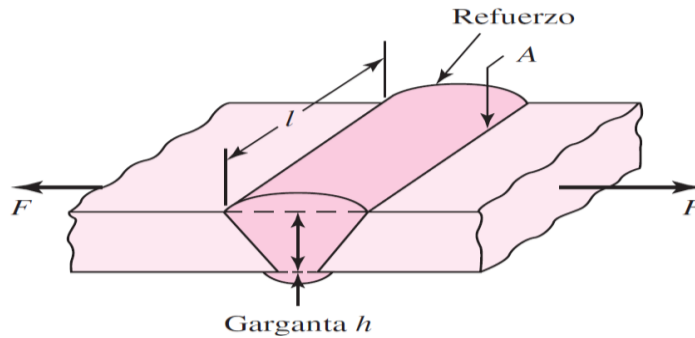


Figura 2.7 Esquema de la carga aplicada a las paredes del tanque y que debe soportar la soldadura a tope

Fuente: (Budynas R. G., 2008)

Según el Código AISC, se debe seleccionar la soldadura considerando el esfuerzo permisible dependiendo de la carga aplicada, que se calcula con la ecuación 2.28, para el caso de carga axial (Budynas R. G., 2008):

$$\sigma_{perm} = 0.6 S_y \quad Ec(2.39)$$

$$\sigma_{perm} = 0.6(425)$$

$$\sigma_{perm} = 255 \text{ MPa}$$

Como  $2.71 \text{ MPa} < 255 \text{ MPa}$ , se ha comprobado que el electrodo E308L es el apropiado para soldar toda la estructura del tanque.

#### 2.5.5. Selección de cojinetes.

De acuerdo al esquema representado en la figura5, se procedió a calcular los esfuerzos, para luego seleccionar los cojinetes que cumplan los requerimientos.

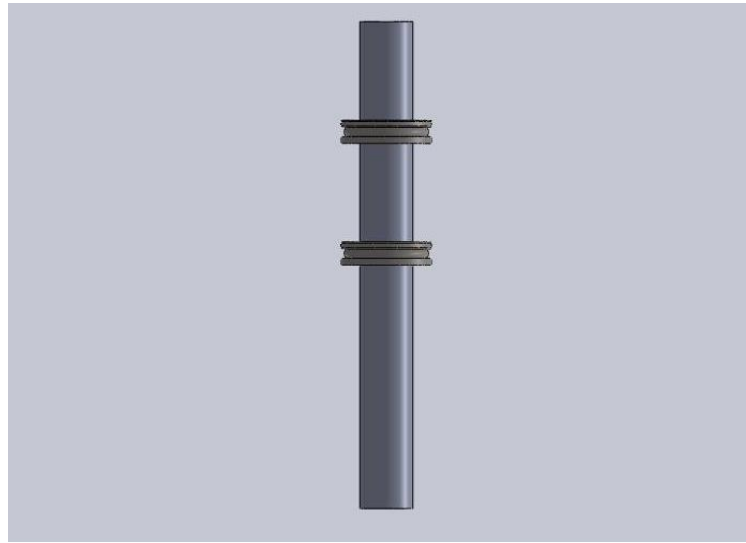


Figura 2.8 Esquema del árbol del rotor que se va a diseñar  
Fuente: (Autoría propia, 2015)

Para esto fue necesario realizar un diagrama de cuerpo libre sobre el eje, para determinar las fuerzas a las que se va someter, y sus direcciones, que se representan en la figura 2.9.

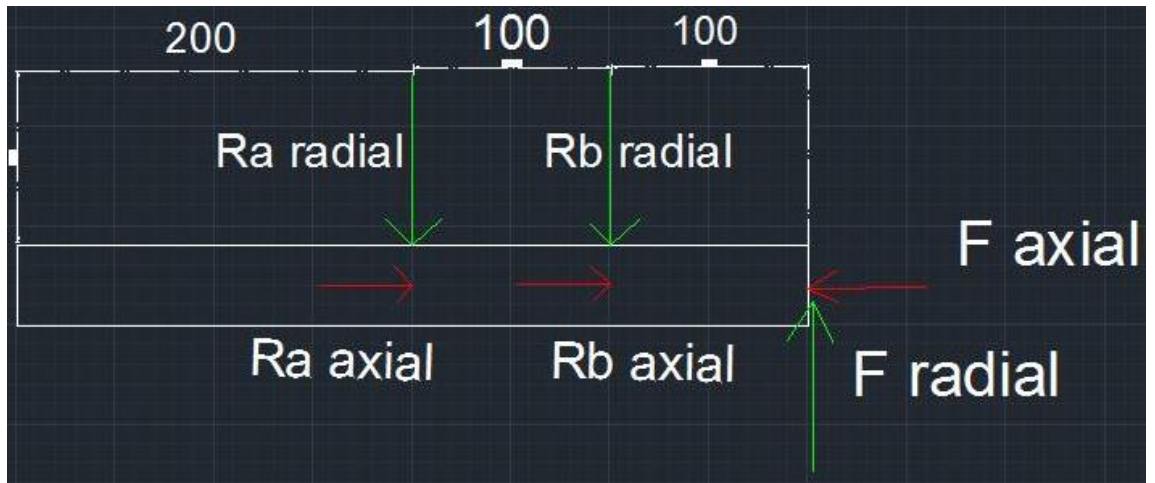


Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre del árbol  
Fuente (Autoría propia, 2015)

$$R_a + R_b = F_{radial} \quad Ec(2.40)$$



$$R_a(0.1) + (0.7)F_{radial} = 0$$

$$R_a = 7F_{radial}$$

$$R_a = 70N \downarrow$$

Reacciones en los cojinetes:

$$R_{Br} = 60 N \uparrow radial$$

$$R_{Ba} = 1205.4N axial$$

Peso del rotor y del volumen contenido de agua:

$$Vol. rotor = 0.06m^3$$

$$M_{rotor} = 8000 \frac{kg}{m^3} \times 0.009 m^3$$

$$M_{rotor} = 71kg$$

$$Vol. Agua = 0.051m^3$$

$$Masa de Agua = 51kg$$

Se procede a seleccionar los cojinetes del catálogo de NTN (NTNAmericas, 2015), mostrado en la figura 6.1 de la sección Anexos, donde se obtuvieron los siguientes datos:

Tiempo de vida útil del cojinete, para maquinas fabricadoras de papel (Budynas R. G., 2008):

$$L_{10}h = 60000horas$$

$$Pr = xFr + yFa \quad ec(2.41) \text{ (Budynas R. G., 2008)}$$

Se asume que  $x = 0.56$  ;  $y = 1.55$  de acuerdo a la tabla de carga radial equivalente del catálogo NTN para rodamientos de bolas rígidos, por lo que la carga dinámica equivalente se determina de acuerdo a la ecuación 2.41 es:

$$Pr = 0.56Fr + 1.55Fa \quad Ec(2.41)$$

$$Pr = 1901.97N$$

Capacidad básica de carga dinámica (Budynas R. G., 2008):

$$C_r = \left( \frac{60n.L_{10h}}{10^6} \right)^{1/3} \quad Ec(2.42) \text{ (Budynas R. G., 2008)}$$

$$C_r = \left( \frac{60(460rpm).60000}{10^6} \right)^{1/3}$$

$$C_r = 11.83(1901.97)$$

$$C_r = 22502.13N$$

Verificando un cojinete rígido de bolas que tenga un  $C_r$  igual o mayor, se selecciona el 6208, el que tiene las siguientes características:

$$Cr = 29.1KN, \quad Cor = 17.8KN, \quad Fo = 14$$

Se define el factor de carga en la ecuación 2.43 (Budynas R. G., 2008):

$$Fc = \frac{f_o f_a}{C_{or}} \quad Ec(2.43)$$

$$fc = \frac{14x(1205.4)N}{17800N}$$

$$fc = 0.95$$

Con el valor de  $f_c$ , se interpola el valor de  $e$ , para así analizar cuál es la fuerza predominante en el cojinete.

$$e = 0.26 + \frac{0.28 - 0.26}{1.3 - 0.689} (0.95 - 0.689)$$

$$e = 0.27$$

Con este valor se tienen los nuevos factores X y Y, para realizar una segunda iteración.

$$y = 1.71 + \frac{1.55 - 1.71}{0.28 - 0.26} (0.27 - 0.26)$$

El factor X para cualquier caso es 0.56, por lo tanto, los valores de Pr y Cr correspondientes según la ecuación 2.41 y 2.42 son:

$$Pr = 0.56Fr + 1.63Fa$$

$$Pr = 1998.4$$

$$Cr = 11.83(1998.4)$$

$$Cr = 23.64KN$$

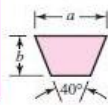
Al volver a calcular  $e$  y  $Cr$ , se obtiene el mismo cojinete, por lo que se concluye que se requieren 2 cojinetes 6208.

### 2.5.6. Diseño del sistema de transmisión de movimiento.

Debido a que la reducción de velocidades es de 2 a 1, se diseñó un sistema de transmisión por poleas, asumiendo un factor de servicio igual a 1.2, y se seleccionó bandas en 'v'. Como se muestran en la figura 7.

**Tabla 17-9**

Secciones de bandas en V estándar



Sección de la banda	Ancho <i>a</i> , pulg	Espesor <i>b</i> , pulg	Diámetro mínimo de polea, pulg	Intervalo de potencias (hp), una o más bandas
A	$\frac{1}{2}$	$\frac{11}{32}$	3.0	$\frac{1}{4}$ -10
B	$\frac{21}{32}$	$\frac{7}{16}$	5.4	1-25
C	$\frac{7}{8}$	$\frac{17}{32}$	9.0	15-100
D	$1\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$	13.0	50-250
E	$1\frac{1}{2}$	1	21.6	100 y mayores

**Tabla 17-10**

Circunferencias interiores de bandas en V estándar

Sección	Circunferencia, pulg
A	26, 31, 33, 35, 38, 42, 46, 48, 51, 53, 55, 57, 60, 62, 64, 66, 68, 71, 75, 78, 80, 85, 90, 96, 105, 112, 120, 128
B	35, 38, 42, 46, 48, 51, 53, 55, 57, 60, 62, 64, 65, 66, 68, 71, 75, 78, 79, 81, 83, 85, 90, 93, 97, 100, 103, 105, 112, 120, 128, 131, 136, 144, 158, 173, 180, 195, 210, 240, 270, 300
C	51, 60, 68, 75, 81, 85, 90, 96, 105, 112, 120, 128, 136, 144, 158, 162, 173, 180, 195, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420
D	120, 128, 144, 158, 162, 173, 180, 195, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 480, 540, 600, 660

**Figura 2.10 Especificaciones para bandas en V.**

Fuente (Budynas R. G., 2008)

Como se muestra en la figura 7 se seleccionó una banda tipo D, con la cual se obtienen varios parámetros de diseño: (Budynas R. G., 2008):

$$\text{Ancho } a = 31.75\text{mm}$$

$$\text{Espesor } b = 19.05\text{mm}$$

$$\text{Diámetro mínimo de polea } d = 330.2\text{mm}$$

$$\text{Intervalo de Potencia} = 37.28 - 186.42 \text{ Kw}$$

Se requiere calcular la longitud de la banda, que se determina con la ecuación 2.44. (Budynas R. G., 2008)

$$L_p = 2C + \pi \frac{D + d}{2} + \frac{(D - d)^2}{4C} \quad \text{Ec(2.44)}$$

Donde  $C$  es la distancia entre centros de las poleas. Para un buen diseño del sistema transmisión, se debe cumplir con lo que establece la ecuación 2.45 (Budynas R. G., 2008).

$$3(D + d) \geq C \quad Ec(2.45)$$

$$3(660.4 + 330.2) \geq C$$

$$C \leq 2971.8mm$$

Con lo que se seleccionó una distancia entre centros de  $C=1882.28mm$ , y posteriormente se reemplazan los datos obtenidos en la ecuación 2.44.

$$L_p = 2(2032) + \pi \frac{660.4 + 330.2}{2} + \frac{(660.4 - 330.2)^2}{4(2032)}$$

$$L_p = 5334mm$$

Luego se procedió a calcular el número de bandas necesarias con la ecuación 2.46, y se escoge como resultado el entero mayor obtenido con dicha ecuación (Budynas R. G., 2008), se trabajó con un factor de servicio de 1.2.

$$N_b \geq \frac{H_d}{H_a} \quad Ec(2.46)$$

Donde,  $H_d$  es la potencia de diseño, y  $H_a$  es la potencia permitida por la banda. (Budynas R. G., 2008)

Podemos definir  $H_d$  con la ecuación 2.47. (Budynas R. G., 2008)

$$H_d = H_{nom} K_s N_d \quad Ec(2.47)$$

Donde  $H_{nom}$  es la potencia nominal que va a ser ejercida por el motor, y es igual a 28kw,  $K_s$  es el factor de servicio proporcionado en la figura.7. (Budynas R. G., 2008)

**Tabla 17-15**

Factores de servicio sugeridos  $K_s$  para transmisiones de banda en V

Maquinaria impulsada	Fuente de potencia	
	Características del par de torsión normal	Par de torsión alto o no uniforme
Uniforme	1.0 a 1.2	1.1 a 1.3
Impacto ligero	1.1 a 1.3	1.2 a 1.4
Impacto medio	1.2 a 1.4	1.4 a 1.6
Impacto pesado	1.3 a 1.5	1.5 a 1.8

**Figura 2.11 Factores de servicio tabulados**  
Fuente (Budynas R. G., 2008)

Y se puede definir  $H_a$  con la ecuación 2.48. (Budynas R. G., 2008)

$$H_a = k_1 k_2 h_{tab} \quad Ec(2.48)$$

Donde  $k_1$  y  $k_2$  son los factores de corrección del ángulo de cobertura y de longitud de la banda respectivamente, y  $h_{tab}$  es la potencia tabulada para una banda. Estos 3 datos se muestran en las figuras 2.12, 2.13 y 2.14, respectivamente (Budynas R. G., 2008).

**Tabla 17-14**

Factor de corrección de longitud de banda  $K_2^*$

Factor de longitud	Longitud nominal de la banda, pulg				
	Bandas A	Bandas B	Bandas C	Bandas D	Bandas E
0.85	Hasta 35	Hasta 46	Hasta 75	Hasta 128	
0.90	38-46	48-60	81-96	144-162	Hasta 195
0.95	48-55	62-75	105-120	173-210	210-240
1.00	60-75	78-97	128-158	240	270-300
1.05	78-90	105-120	162-195	270-330	330-390
1.10	96-112	128-144	210-240	360-420	420-480
1.15	120 y mayor	158-180	270-300	480	540-600
1.20		195 y mayor	330 y mayor	540 y mayor	660

\*Multiplique la potencia nominal de la banda por este factor para conseguir la potencia corregida.

**Figura 2.12 Factor de corrección  $k_2$  debido a la longitud de la banda**  
Fuente (Budynas R. G., 2008)

**Tabla 17-13**

Factor de corrección del ángulo de contacto  $K_1$  para transmisiones de banda plana VV\* y en V

$\frac{D-d}{C}$	$\theta$ , grados	VV	$K_1$ Plana en V
0.00	180	1.00	0.75
0.10	174.3	0.99	0.76
0.20	166.5	0.97	0.78
0.30	162.7	0.96	0.79
0.40	156.9	0.94	0.80
0.50	151.0	0.93	0.81
0.60	145.1	0.91	0.83

Figura 2.13 Factor de corrección debido al ángulo de contacto,  $k_1$

Fuente (Budynas R. G., 2008)

Sección de la banda	Diámetro de paso de la polea, pulg	Velocidad de la banda, pie/min				
		1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
	16.0	7.66	13.2	17.1	19.2	19.0
	17.0 y mayor	8.01	13.9	18.1	20.6	20.7

Figura 2.14 Potencia permisible de la banda, de acuerdo a la velocidad de trabajo

Fuente. (Budynas R. G., 2008)

Se utilizan estos datos para reemplazar en la ecuación 2.46 y obtener el número de bandas necesarias para la transmisión.

$$N_b \geq \frac{H_d}{H_a} \quad Ec(46)$$

$$N_b \geq \frac{H_{nom} K_s \cdot Nd}{k_1 k_2 h_{tab}}$$

$$N_b \geq \frac{28 \cdot (1.3) \cdot (1.2)}{0.78(0.95)(15.44)}$$

$$N_b \geq 3.82$$

Por lo tanto, el valor de  $N_b$  que se debe seleccionar es el entero mayor obtenido anteriormente, por lo tanto, necesitamos operar con 4 bandas en 'V' con los parámetros de diseño ya mencionados.

#### 2.5.7. Diseño de la sujeción del rotor con el tanque.

El rotor debe ser sujetado con el tanque por medio de pernos, según la observación que se realizó en otro tipo de diseños (kadant, s.f.), se procedió a calcular el análisis de esfuerzos producidos por la tensión generada en el tanque, los esfuerzos cortantes son despreciables, por lo tanto, no se los desarrollo en este proyecto.

Se hizo un análisis de tensión como se muestra en la figura 11.

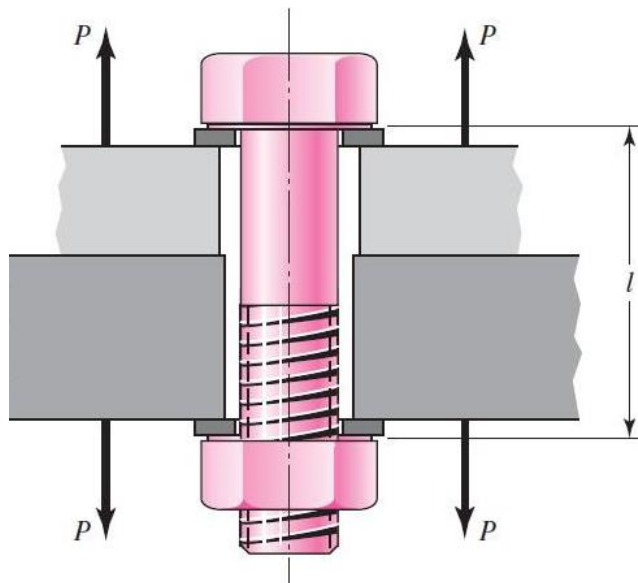


Figura 2.15 Esquema de las cargas de tensión aplicada en los pernos

Fuente (Budynas R. G., 2008)

Se seleccionó un perno M14, el cual debe cubrir la longitud de la placa que soporta el rotor, y el tanque, ambas tienen 10mm de espesor, y la longitud de la tuerca  $h=12.8$ , más el espesor de la arandela  $t=2$ mm.



Lo primero que se deba calcular es  $K_m$ , que es la rigidez equivalente de los elementos de la unión, que se define por la ecuación 2.49 (Budynas R. G., 2008)

$$k_m = \frac{\pi E d \tan \alpha}{2 \ln \frac{(l \tan \alpha + d_w - d)(d_w + d)}{(l \tan \alpha + d_w + d)(d_w - d)}} \quad \text{Ec(2.49)}$$

Donde  $l$  es la longitud de agarre,  $\alpha$  es el ángulo del cono de presión que es igual a 30 grados, E es el módulo de Young del acero, d es el diámetro del perno y  $d_w$  es el diámetro de la arandela igual a 25mm. Reemplazando estos valores en la ecuación 2.49 se obtiene que:

$$k_m = \frac{\pi(200\text{Gpa})(0.014)\tan 30}{2 \ln \frac{(22 \tan 30 + 25 - 14)(25 + 14)}{(22 \tan 30 + 25 + 14)(25 - 14)}}$$

$$k_m = 1.047 \times 10^{10} \text{ N/m}$$

Lo siguiente que se procede a calcular es la rigidez del perno  $k_b$  (Budynas R. G., 2008).

$$k_b = \frac{A_t E}{l}$$

Donde  $A_t$  es el área de tensión del perno obtenida de la figura 13 (Budynas R. G., 2008).

Diámetro mayor nominal $d$ , mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso $p$ , mm	Área de esfuerzo de tensión $A_t$ , mm <sup>2</sup>	Área del diámetro menor $A_r$ , mm <sup>2</sup>	Paso $p$ , mm	Área de esfuerzo de tensión $A_t$ , mm <sup>2</sup>	Área del diámetro menor $A_r$ , mm <sup>2</sup>
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157

Figura 2.16 Propiedades geométricas de los pernos

Fuente (Budynas R. G., 2008)

Por consiguiente, se reemplazan los datos en la ecuación 2.49, y se obtiene que

$$k_b = 0.11 \times 10^{10} \text{ N/m}$$

Con estos valores se calcula C, que es la constante de rigidez de la unión, según la ecuación 2.50 (Budynas R. G., 2008).

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad Ec(2.50)$$

Reemplazando, se obtiene

$$C = 0.1$$

Es necesario calcular el esfuerzo de precarga  $G_i$ , que se puede definir según la ecuación 2.51. (Budynas R. G., 2008)

$$G_i = \frac{0.75 A_t S_p}{A_t} \quad Ec(2.51)$$

Donde  $S_p$  se lo puede obtener de la figura 14. (perno, s.f.)

<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Elongación (%)	< 60
Dureza Brinell	160-190
Impacto Izod (J*m <sup>-1</sup> )	20-136
Módulo de elasticidad (MPa)	190-210
Resistencia a tracción (MPa)	460-1100
Resistencia a la corrosión	+ 504 horas sin variación (inox)
Ensayo niebla salina UNE 112017:92	+ 650 horas sin variación (inox recubierto titan)
<b>Propiedades Físicas</b>	
Densidad	7.93 g*cm <sup>3</sup>

Figura 2.17 Propiedades mecánicas de los pernos M14  
Fuente (perno, s.f.)

Reemplazando en la ecuación 2.51, se obtiene.

$$G_i = 202.5 \text{ MPa}$$

Para concretar que el cálculo del perno asegure un buen funcionamiento del sistema de sujeción, se deben determinar el factor de carga, el factor de seguridad contra la separación de la unión, y el factor de seguridad contra la fatiga, que se determinan con las ecuaciones 2.52, 2.53, 2.54.

$$n = \frac{S_p A_t - 0.75 A_t S_p}{C P_{max}} \quad Ec(2.52)$$

$$n_o = \frac{F_i}{P(1 - C)} \quad Ec(2.53)$$

$$n_f = \frac{S_e(S_{ut} - G_i)}{G_a(S_{ut} - S_e)} \quad Ec(2.54)$$

Donde  $P_{max}$  se obtiene del cálculo de cojinetes en la sección 2.5.5 Ecuación 2.40,  $F_i$  es la precarga y se la puede asumir un 75% de la resistencia de prueba para este diseño,  $G_a$  es el esfuerzo alternante del

perno,  $S_{ut}$  se obtiene de la figura 14, y  $S_e$  finalmente se obtiene de la figura 15 que se muestra a continuación. (Budynas R. G., 2008).

Grado o clase	Intervalo de tamaños	Resistencia a la fatiga
SAE 5	$\frac{1}{4}$ -1 pulg	18.6 kpsi
	$1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$ pulg	16.3 kpsi
SAE 7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ pulg	20.6 kpsi
SAE 8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ pulg	23.2 kpsi
ISO 8.8	M16-M36	129 MPa
ISO 9.8	M1.6-M16	140 MPa
ISO 10.9	M5-M36	162 MPa
ISO 12.9	M1.6-M36	190 MPa

Fig. 2.18 Resistencia a la fatiga “Se” tabulada para este clase de pernos  
Fuente (Budynas R. G., 2008)

Reemplazando en las ecuaciones 2.52, 2.53, 2.54, y se obtiene respectivamente que:

$$n = 560$$

$$n_o = 23.33$$

$$n_f = 125$$

# Capítulo 3

## 3.RESULTADOS

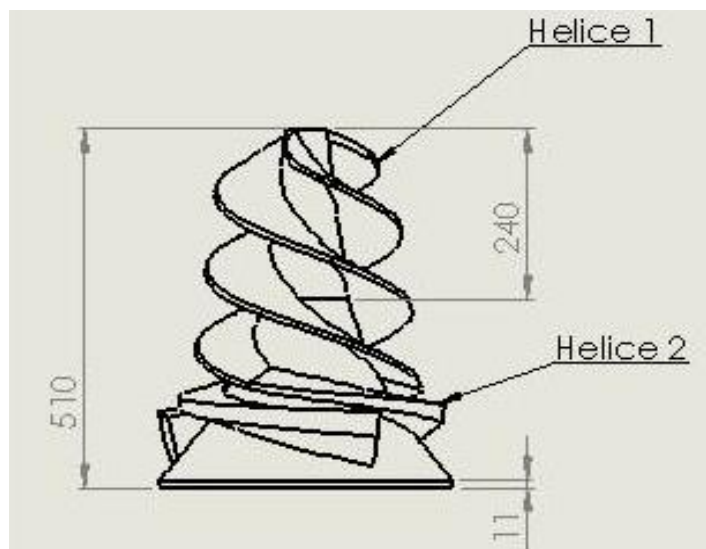
### 3.1. Parámetros de Diseño del Hidropulper

Se logró determinar los parámetros de diseño del hidropulper gracias a los resultados obtenidos en la experimentación realizada en los laboratorios de Química de la FCNM de la ESPOL, que se encuentran en las tablas 2.5 y 2.6, con lo que se obtuvieron los resultados obtenidos en las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, y 3.5.

**Tabla 3.1. Resultados de dimensiones principales del tanque**

Tanque o Criba		
Altura(mm)	D. Mayor(mm)	Espesor(mm)
965	1143	3

La figura 1 muestra un esquema de la forma del rotor helicoidal, con la que posteriormente, se simularía el comportamiento del fluido, afectado por este sistema.



**Figura 3.1 Esquema del helicoide final, detallando las hélices 1 y 2**

Fuente (Autoría propia, 2015)

Las tablas 3.2 y 3.3 contienen los resultados del dimensionamiento de las hélices del rotor, que se lo dividió en 2 partes, con 2 tipos diferentes de hélices y 2 conicidades.

**Tabla 3.2. Resultados Hélice 1**

Hélice1(1revolución)		
Paso (mm)	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)
330	220	143

**Tabla 3.3. Resultados Hélice 2**

Helice2(1/2 revolución)		
Paso (mm)	D. Mayor(mm)	D. Menor(mm)
330	360	220

Posteriormente, las tablas 3.4 muestra las dimensiones del perfil de cada aspa y la tabla 3.5,indica con qué parámetros de operación se debería trabajar con el hidropulper para alta consistencia para obtener buenos resultados.

**Tabla 3.4. Dimensiones de las Aspas del Helicoide**

Geometría del aspa		
Espesor Inicial(mm)	Espesor Final(mm)	Ancho(mm)
16	11	70

**Tabla 3.5. Parámetros de operación del hidropulper**

Potencia(kw)	Vel. Angular (rpm)	Capacidad de extracción de pulpa (kg)
28kw	460rpm	54.66kg

### 3.2. Simulación del comportamiento cualitativo del fluido.

A continuación, se encuentran las figuras 5, 6 y 7 donde las líneas de flujo nos muestran cómo debería de ser el comportamiento del fluido, que en este caso es una pasta formada por pulpa virgen, aluminio, polietileno, y en su mayoría agua.

Se tiene como resultado que el diseño del hidropulper cumple con el requerimiento principal para lograr el desprendimiento de la pulpa de los envases multicapas, el cual es generar una gran turbulencia.

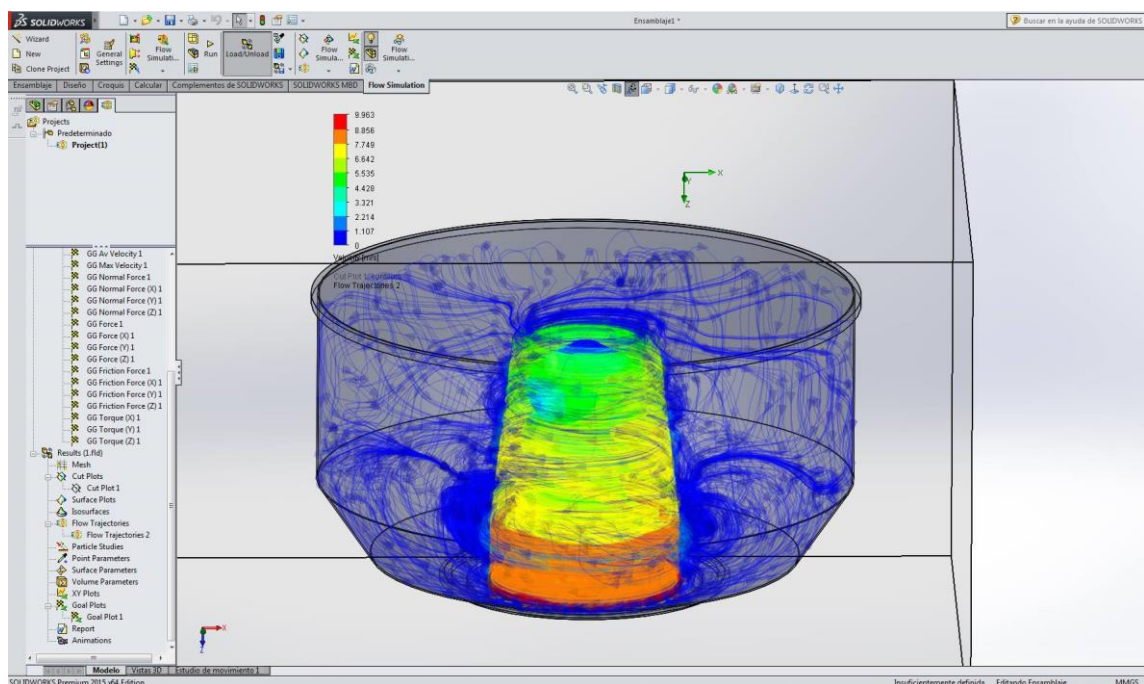
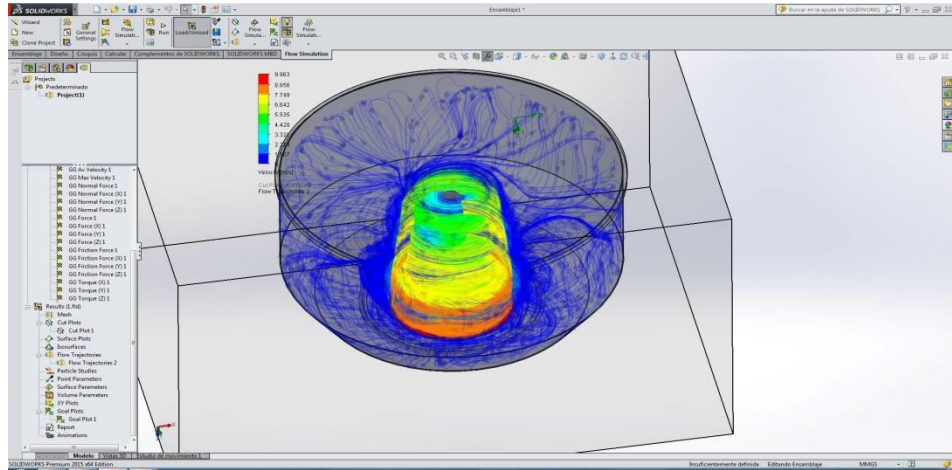


Figura 3.2 Zonas de turbulencia generadas por la rotación del helicoides.

Fuente (Autoría propia, 2015)

Hay que hacer énfasis que esta simulación se realizó con las medidas resultantes que se encuentran en las tablas de parámetros de diseño, es decir, las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5.

Se puede observar que las líneas de fluido que presentan la mayor velocidad son las que se encuentran más cercanas al rotor, y lo contrario sucede con las más lejanas, pero se presenta una turbulencia en todo el fluido dentro del tanque.



**Figura 3.3 Simulación del campo de flujo de velocidad en estado estable**

Fuente: (Autoría propia, 2015)

### 3.3. Análisis de costos

Para estimar cual sería la inversión inicial de este proyecto, se recibieron varias cotizaciones de los componentes del hidropulper si se fabricaran o seleccionaran con proveedores y contratistas locales, las cuales fueron obtenidas gracias a la gestión de INTRAMET. Se presenta este detalle a continuación.

**Tabla 3.6. Precios de adquisición de las diversas partes del equipo**

Costos en dólares de algunas partes del hidropulper(USD)		
Helicoide	Tanque	Motor
4000	2000	7500



**Tabla 3.7. Costos de montaje del sistema**

<b>Costos de Instalación (15 DÍAS), (USD).</b>						
<b>Tornero</b>	<b>Ensamblador</b>	<b>Soldador</b>	<b>Ayudantes 2</b>	<b>Materiales y herramientas de instalación</b>	<b>Impuesto a la renta</b>	<b>Costo total de instalación</b>
30/día	30/día	30/día	20/día	500	30%	2150

Cabe recalcar que los costos que se presentan en el proyecto no incluyen los costos de obra civil como cimentaciones, terreno, galpones, etc.

**Tabla 3.8. Costos de las partes móviles de la transmisión del sistema (USD)**

<b>Elementos para transmisión de movimiento y potencia</b>	
<b>Rodamientos</b>	15.84 x 2
<b>Árbol</b>	200
<b>Bandas</b>	60 x 2
<b>Poleas</b>	220 x 2
<b>Empaquetadura</b>	40
<b>Total</b>	\$ 470

Con lo que se puede obtener un costo total de fabricación y montaje de maquinaria igual a \$16355.68.

# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El diseño del Hidropulper para alta consistencia, de ser construido, conllevaría a una reducción del impacto ambiental que representan los envases desechados. Además, considerando su alto precio por tonelada, se considera rentable recuperar la fibra virgen de estos envases, y comercializarla a empresas que produzcan papel y sus derivados, sin dejar a un lado la disminución de la tala de árboles que supondría suministrar directamente pulpa de papel a la industria papelera.

De la simulación mostrada en las figuras en el apartado 3.2, se obtuvo una apreciación del comportamiento del flujo dentro del tanque ante la rotación del elemento helicoidal, verificándose que existen varias zonas de turbulencia, lo cual aumenta el mezclado entre el cartón y el agua.

Este elemento helicoidal se logra dimensionar a partir de análisis experimental y simulaciones con el método de CFD (Computational Fluid Dynamics), y no existe un patrón a seguir, por lo que se procedió a realizar una simulación de cómo se comportaría la mezcla, de ser fabricado el hidropulper para poder llegar a conclusiones más relevantes posteriormente.

El trabajo realizado no consideró la posible cavitación en las cercanías de las aspas del rotor, ya que no se encontró valores experimentales de la presión de vapor de la mezcla y la expresión para la presión manométrica del flujo dentro del tanque hallada en la sección 2.5.4 es aproximada, por lo que su consideración permitiría realizar un diseño más completo de este tipo de sistemas. Para este propósito, se podría utilizar programas computarizados más sofisticados, con los cuales se podría simular de forma más detallada y realista del campo de presión, alterando las demás variables para evitar que ocurra este fenómeno. A su vez, se tendría que realizar experimentos para determinar la presión de vapor de la mezcla considerando el leve aumento de temperatura debido a la fricción entre capas.

Otra herramienta invaluable sería la construcción y experimentación con varios modelos a escala, ya que los resultados permitirían mejorar el proceso de separación de pulpa y comprobar que la longitud de las fibras es la adecuada. A su vez, se tendría valores reales del tiempo aproximado que le toma a la pulpa para separarse completamente.

De la ecuación 2.35, se aprecia la dependencia de la presión con el valor  $r^4 - r_o^4$ , por lo que los valores máximos de presión ocurrirán en las paredes del tanque, y los mínimos en las partículas en contacto con el rotor. Esto se debe considerar para la posible cavitación en las cercanías del helicoides, ya que puede ocurrir que la presión en regiones cercanas al rotor sea más baja que la presión de vacío del fluido de trabajo.

#### **4.1. Conclusiones**

Se diseñó un sistema que permite separar las fibras de cartón del resto de componentes de los envases tetrabrik, considerando el tipo de fluido con el que se estaba trabajando, el comportamiento del flujo necesario para lograr el efecto de fricción entre capas, además de los parámetros que se requieren para el diseño del tanque, elementos de transmisión de potencia y movimiento rotacional.

La mezcla, al ser un fluido pseudoplástico, posee una alta resistencia al fluir a bajas valores de rpm, pero al estar sometido a altas velocidades, se supera un valor de esfuerzo cortante en que el fluido se comporta como un fluido newtoniano, lo cual facilitó los cálculos para diseñar el tanque y el análisis del flujo dentro del mismo. Este comportamiento también influyó en las relaciones de potencia y velocidad angular obtenidas de los números adimensionales obtenidos, lo cual fue analizado en términos de la potencia requerida en el motor y si la velocidad en el rotor no era muy alta, ya que podría producirse cavitación.

De la experimentación realizada en laboratorio, se comprobó que los materiales de los envases tetrabrik necesitan únicamente agua y agitación

interna para separarse. La forma particular del rotor helicoidal se debe a que acelera el proceso de separación, ya que produce las fuerzas de fricción e hidráulicas necesarias para aislar la pulpa del aluminio y el polietileno. Debido a esto, se reduce considerablemente el tiempo de mezclado y se puede lograr un aumento de la producción de pulpa de las industrias papeleras. A su vez, cumple con el requerimiento de tener una mayor área de rotación para generar la turbulencia requerida, ya que, al aumentar la consistencia, aumenta la viscosidad aparente del fluido.

Para este diseño resulta más factible realizar la transmisión de potencia por bandas y poleas, debido a que la reducción de velocidades no es muy significativa, además de necesitarse velocidades elevadas, en donde este sistema de transmisión trabaja de manera eficiente.

## **4.2. Recomendaciones**

Para realizar un diseño más detallado de este sistema, sería necesario realizar una simulación cuantitativa del comportamiento del fluido, ya que la condición más importante para que se culmine el proceso de separación de pulpa, es conseguir la mayor turbulencia posible, y para calcular el tiempo de mezclado se debe realizar una simulación mucho más compleja, utilizando un programa de computadora que pueda modelar la mezcla.

El material con que se debe fabricar el rotor y el tanque debe ser una aleación que resista la corrosión de tipo bacteriana, además del hecho de que el proceso se desarrolla en un medio acuoso, el cual es de carácter corrosivo, y también debe soportar la abrasión producida por la fibra, por lo que el material más idóneo es el acero inoxidable de la serie 316L.

En caso de construir el prototipo, se recomienda realizar pruebas previas a la aplicación de la maquinaria con fines productivos, para poder tabular correctamente los tiempos de mezclado, vaciado y llenado del hidropulper, los cuales son importantes de calcular experimentalmente para implementación industrial.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Bavaresco, I. G. (s.f.). *G.A.B.P. Ingeniería*. Obtenido de [http://gabpingeneria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/que\\_es\\_el\\_torque.pdf](http://gabpingeneria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/que_es_el_torque.pdf)
- Budynas, R. G. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Diario El Tiempo. (23 de 08 de 2015). Obtenido de <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/167092-el-tetrapack-se-convierte-en-casas/e>
- Green Peace. (02 de 2006). Obtenido de <http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2006/4/el-futuro-de-la-produccion-de.pdf>
- INDURA. (12 de 02 de 2015). *INDURA*. Obtenido de <http://www.indura.com.ec/Web/EC/Biblioteca/Catalogos>
- kadant. (s.f.). Obtenido de [www.kadant.com](http://www.kadant.com)
- Morrison, F. A. (2011). Obtenido de <http://www.chem.mtu.edu/~fmorriso/cm310/Navier.pdf>
- Moseley, M. R. (2012). Obtenido de <http://bw-f57a2f557b098c43f11ab969efe1504b-bwcore.s3.amazonaws.com/photos/File580.pdf>
- NTNAmericas. (20 de 11 de 2015). *NTN*. Obtenido de <http://www.ntnamericas.com/es/folletos-y-material-informativo/catalogos>
- Paul, E. L. (2004). *Handbook of industrial mixing*. New Jersey: NAMF.
- perno, L. c. (s.f.). Obtenido de [http://www.casadelperno.com/Documentos/Ficha\\_Tecnica\\_Inox\\_SS304.pdf](http://www.casadelperno.com/Documentos/Ficha_Tecnica_Inox_SS304.pdf)
- SCA. (2010). *SCA Publication Papers*.
- Schuring, D. J. (1977). *Scale Models in Engineering*. New York.
- Silva, A. C. (2 de Marzo de 2015). Obtenido de <http://fabricaciondepulpaypapel1930175.blogspot.com/2015/03/proceso-de-fabricacion-de-pulpa-y-papel.html>
- Tetra Pak. (2014). Obtenido de <http://www.tetrapak.com/mx/about/history>
- Textos Científicos. (28 de 12 de 2005). Obtenido de <http://www.textoscientificos.com/papel/fibras>

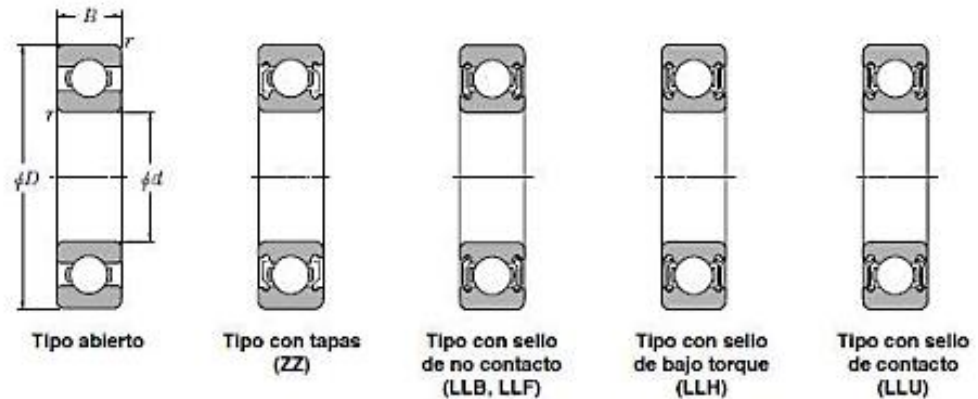
White, F. M. (2008). *Fluids Mechanics*. Fernandez: INTERAMERICANA DE ESPAÑA.  
S. A. U.

WILEY-VCH. (2006). *Handbook of pulp*. Austria: Hebert sexta.

Yabar, E. (3 de 8 de 2010). *Scribd*. Obtenido de  
<http://es.scribd.com/doc/35266576/Envases-Tetra-Pack#scribd>

## 6. ANEXOS

### ● Rodamientos Rígidos de Bolas



d 40 ~ 60mm

d	Dimensiones principales				Capacidades básicas de carga				Factor $f_0$	Velocidades límites				Números de rodamientos				
	mm		$r_{ms}^{(1)}$ mm		kN		kgf			r.p.m.		r.p.m.		tipo abierto	con tapas	con sello de no contacto	con sello de bajo torque	con sello de contacto
	D	B	$r_{ms}^{(1)}$	$r_{ms}^{(1)}$	$C_r$	$C_{or}$	$C_r$	$C_{or}$		grasa tipo abierto	aceite tipo abierto	LLH	LLU					
40	52	7	0.3	0.3	5.10	4.40	520	445	16.3	12 000	14 000	—	6 700	6808	ZZ	LLB	—	LLU
	62	12	0.6	0.5	12.2	8.90	1 240	910	15.8	11 000	13 000	—	6 300	6908	ZZ	LLB	—	LLU
	68	9	0.3	—	12.6	9.65	1 290	985	16.0	10 000	12 000	—	—	16008	—	—	—	—
	68	15	1	0.5	16.8	11.5	1 710	1 170	15.2	10 000	12 000	7 300	6 100	6008	ZZ	LLB	LLH	LLU
	80	18	1.1	0.5	29.1	17.8	2 970	1 920	14.0	8 700	10 000	6 700	5 600	6208	ZZ	LLB	LLH	LLU
	90	23	1.5	0.5	40.5	24.0	4 150	2 450	13.2	7 800	9 200	6 400	5 300	6308	ZZ	LLB	LLH	LLU
	110	27	2	—	63.5	36.5	6 500	3 750	12.3	7 000	8 200	—	—	6408	—	—	—	—
	58	7	0.3	0.3	5.35	4.95	550	500	16.1	11 000	12 000	—	5 900	6809	ZZ	LLB	—	LLU

Figura 6.1 Catálogo de rodamientos rígidos de bolas, resaltando el mecanismo seleccionado  
Fuente. (NTNAmericas, 2015)

**Aleación para la Soldadura**  
Fuerte de Bronces - Latones y materiales ferrosos recubierta con fundente flexible

**Características Especiales:**

Indura 127 FX, es una aleación para la soldadura fuerte especialmente formulada para soportar altos esfuerzos mecánicos. Contiene Manganeso para mayor resistencia - Silicio como agente desoxidante y Estaño para una mayor resistencia a la oxidación. En su tipo es la de mayor fluidez, produce uniones metalúrgicas de alta resistencia mecánica y de inmejorable estabilidad química ante agentes de corrosión. Durante el proceso de soldadura produce bajísimos índices de humos. Muy fácil de usar. Produce terminaciones limpias con ausencia de poros. En bronce y latones, sus depósitos toman el matiz del metal base.

No necesita fundente. El fundente va adherido a la varilla.

**Norma Internacional:**

ANSI / AWS : A5.8 - 92  
AWS : RB Cu Zn-C

**Características Técnicas:**

Color del revestimiento : Azul  
Temperatura de trabajo : 866 - 888°C  
Resistencia a la tracción : 40 - 45 Kg./mm<sup>2</sup>  
Dureza : 80 - 100 HB

**Análisis químico nominal (%):**

Cu : 57.0 %  
Sn : 1.0 %  
Mn : 0.20 %  
Mn : 0.20 %  
Si : 0.10 %  
Zn : Balance

**Varilla TIG 308-L (AWS ER - 308L)**



**Aplicaciones Generales:**

Aceros Inoxidable Tipo 308L - 304L - 308 - 321 - 347

Se utiliza en equipos de procesos y almacenamiento de productos alimenticios y químicos.

Se aplica en bombas, intercambiadores de calor, etc.

**Propiedades del metal de adición**

Composición química (nominal), %

C: <0,025 Si: 0,4 Mn: 1,8 P: <0,025 S: <0,015  
Cr: 20 Ni: 10 Mo: <0,5 Co: <0,20 Cu: <0,2  
N: 0,060

**Propiedades mecánicas:**

Temperatura	°C	20	400	-196
Resistencia ensayo, R	Mpa	390	290	-
Resistencia a tracción R	Mpa	600	440	-
Alargamiento, A1	%	34	25	-
Reducción de área	%	56	-	-
Energía de Impacto, Charpy V	J	135	-	60
Dureza, Vickers		160	-	-



**Soldadura TIG**

Los parámetros para soldar con TIG son, en gran parte, dependientes del espesor del material y la aplicación a soldar. Para evitar la fusión del electrodo de de tungsteno deberá ser utilizada la polaridad directa (electrodo negativo) y un gas de protección inerte, tal como Argón o Helio.

**Varilla TIG 316-L (AWS ER - 316L)**



**Aplicaciones Generales:**

Diseñado especialmente para soldar aceros inoxidables austeníticos tipo 316L - 316 - 318.

Su uso es principalmente en la industria alimenticia, de papel, turbinas, bombas, etc. Se recomienda para aplicaciones resistentes a la corrosión cuando hay posibilidades de picadura (ataque por ácido).

**Propiedades del metal de adición**

Composición química (nominal), %

C: <0,020 Si: 0,4 Mn: 1,8 P: <0,025 S: <0,015  
Cr: 18,5 Ni: 12,5 Mo: 2,6 Co: <0,10 Cu: <0,05  
N: <0,060

**Propiedades mecánicas:**

Temperatura	°C	20	400	-196
Resistencia ensayo, R	Mpa	390	290	-
Resistencia a tracción R	Mpa	600	470	-
Alargamiento, A1	%	35	26	-

Figura 6.2 Manual de soldadura, donde se muestra el electrodo seleccionado en el proyecto.  
Fuente (INDURA, 2015)