



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

Diseño de un proceso industrial para la obtención de celulosa microcristalina a partir del *Pennisetum purpureum* mediante combinación de hidrólisis ácida y alcalina para la Asociación Agropecuaria “Maconta Arriba”

**JAVIER IGNACIO BRIONES GARCÍA**

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA APLICADA**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**JULIO 2023**

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, **JAVIER IGNACIO BRIONES GARCÍA**, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

Riobamba, julio de 2023



---

**Javier Ignacio Briones García**

**CI: 1313371013**

© 2023, **Javier Ignacio Briones García**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad **Proyectos de Investigación y desarrollo**, titulado Diseño de un proceso industrial para la obtención de celulosa microcristalina a partir del *Pennisetum purpureum* mediante combinación de hidrólisis ácida y alcalina para la Asociación Agropecuaria “Maconta Arriba”, de responsabilidad del señor Javier Ignacio Briones García ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida PhD  
**PRESIDENTE**



Firmado electrónicamente por:  
**LUIS EDUARDO  
HIDALGO  
ALMEIDA**

---

Ing. William Xavier Ibáñez Moreno M. Sc.  
**TUTOR**



Firmado electrónicamente por:  
**WILLIAM  
XAVIER IBANEZ  
MORENO**

---

Ing. Carlos Alcibar Medina Serrano Mgtr.  
**MIEMBRO**



Firmado electrónicamente por:  
**CARLOS ALCIBAR  
MEDINA SERRANO**

---

Dr. Hernán Patricio Tixi Toapanta Mgtr.  
**MIEMBRO**



Firmado electrónicamente por:  
**HERNAN  
PATRICIO TIXI  
TOAPANTA**

---

Riobamba, julio 2023

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme disfrutar de cada día de vida guiando mi camino en cada uno de mis sueños y anhelos sin ti nada sería posible.

A mis padres quienes con su amor incondicional y su ejemplo me han enseñado a ser un guerrero de la vida a pesar de las circunstancias.

A mi hija por ser el motor y la razón de cada uno de mis logros.

A mi esposa por su motivación y apoyo que me ha brindado en mis proyectos académicos y también de vida.

*Javier Briones*

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, prestigiosa institución a la cual me debo, y me ha brindado la oportunidad de desarrollarme académica y profesionalmente, de la cual he recibido el apoyo irrestricto.

Al Msc. William Ibáñez tutor de tesis, por su paciencia y dedicación, al Mgs. Carlos Alcibar y Mgs. Hernán Tixi por sus acertados y valiosos consejos, para la culminación del presente proyecto de investigación.

*Javier Briones*

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN..... xxii

SUMARY ..... xxiii

### CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN.....1

1.1. Problema de Investigación .....1

1.1.1. *Situación Problemática* .....1

1.1.2. *Formulación del problema*.....3

1.1.3. *Problemas Específicos*.....3

1.2. Justificación del proyecto .....3

1.3. Objetivos de la investigación.....5

1.3.1. *Objetivo General* .....5

1.3.2. *Objetivos Específicos* .....5

1.4. Hipótesis.....5

1.4.1. *Hipótesis General* .....5

1.4.2. *Hipótesis Específicas* .....5

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....7

2.1. Antecedentes de la Investigación .....7

2.2. Marco Conceptual .....8

2.2.1. *Diseño de procesos industriales*.....8

2.2.1.1. *Esquema tecnológico de producción* .....8

2.2.1.2.	<i>Escalado de laboratorio</i> .....	9
2.2.1.3.	<i>Escalado de procesos químicos</i> .....	9
2.2.2.	<b><i>Pasto elefante (Pennisetum Purpureum)</i></b> .....	10
2.2.2.1.	<i>Caracterización del forraje</i> .....	10
2.2.3.	<b><i>Fibras lignocelulósicas no madereras</i></b> .....	11
2.2.3.1.	<i>Composición química de las fibras naturales lignocelulósicas no madereras</i> 12	
2.2.4.	<b><i>Productos de material lignocelulósico natural no maderero</i></b> .....	12
2.2.4.1.	<i>Celulosa</i> .....	12
2.2.4.2.	<i>Hidrolisis de la celulosa</i> .....	13
2.2.4.3.	<i>Derivados de la celulosa</i> .....	14
2.2.5.	<b><i>Celulosa microcristalina</i></b> .....	14
2.2.5.1.	<i>Obtención de celulosa microcristalina</i> .....	15

### **CAPÍTULO III**

3.	<b>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	16
3.1.	<b>Metodología</b> .....	16
3.1.1.	<i>Tipo y Diseño de la Investigación</i> .....	16
3.1.2.	<i>Método de investigación</i> .....	16
3.1.3.	<i>Enfoque de la investigación</i> .....	16
3.2.	<b>Identificación de las variables</b> .....	17
3.2.1.	<i>Variable dependiente</i> .....	17
3.2.2.	<i>Variable independiente</i> .....	17
3.2.3.	<i>Operacionalización de variables</i> .....	18
3.2.4.	<i>Matriz de consistencia</i> .....	21
3.3.	<b>Diseño de la investigación</b> .....	23
3.3.1.	<i>Población de estudio</i> .....	23
3.3.2.	<i>Unidad de análisis</i> .....	23



3.3.3.	<i>Selección de la muestra</i> .....	23
3.3.4.	<i>Técnica de recolección de datos</i> .....	23
3.3.5.	<i>Tratamiento y diseño experimental</i> .....	24
<b>3.4.</b>	<b>Procedimiento Experimental</b> .....	<b>24</b>
3.4.1.	<i>Caracterización de la materia prima</i> .....	25
3.4.1.1.	<i>Pretratamiento de la materia prima</i> .....	25
3.4.1.2.	<i>Determinación de extraíbles</i> .....	25
3.4.1.3.	<i>Determinación de humedad</i> .....	25
3.4.1.4.	<i>Determinación de cenizas</i> .....	26
3.4.1.5.	<i>Determinación hemicelulosa</i> .....	26
3.4.1.6.	<i>Determinación de lignina</i> .....	27
3.4.1.7.	<i>Determinación de celulosa</i> .....	27
3.4.2.	<i>Obtención de celulosa microcristalina</i> .....	28
3.4.2.1.	<i>Extraíbles en agua caliente</i> .....	28
3.4.2.2.	<i>Hidrolisis acida</i> .....	28
3.4.2.3.	<i>Hidrolisis alcalina</i> .....	28
3.4.2.4.	<i>Blanqueamiento</i> .....	29
3.4.3.	<i>Normativa de calidad referente a las propiedades de la celulosa microcristalina</i> .....	29
3.4.4.	<i>Diagrama de flujo del proceso</i> .....	29

## CAPÍTULO IV

<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>31</b>
4.1.	<b>Resultados experimentales</b> .....	<b>31</b>
4.1.1.	<i>Caracterización de la materia prima</i> .....	31
4.1.2.	<i>Obtención de celulosa microcristalina</i> .....	31
4.1.3.	<i>Grado de des lignificación</i> .....	32

<b>4.1.4.</b>	<b><i>Análisis estadístico de resultados obtenidos</i></b> .....	<b>33</b>
4.1.4.1.	<i>Rendimiento de los tratamientos</i> .....	33
4.1.4.2.	<i>Porcentaje de pureza de celulosa obtenida</i> .....	36
<b>4.1.5.</b>	<b><i>Propiedades de la celulosa microcristalina obtenida</i></b> .....	<b>38</b>
4.1.5.1.	<i>Solubilidad</i> .....	38
4.1.5.2.	<i>Tamaño de partícula</i> .....	38
<b>4.1.6.</b>	<b><i>Comparación de propiedades de celulosa microcristalina</i></b> .....	<b>39</b>
<b>4.2.</b>	<b><i>Diseño de ingeniería para la obtención de celulosa microcristalina</i></b> .....	<b>40</b>
<b>4.2.1.</b>	<b><i>Balance de masa</i></b> .....	<b>40</b>
4.2.1.1.	<i>Inspección y selección de la materia prima</i> .....	40
4.2.1.2.	<i>Lavado materia prima</i> .....	41
4.2.1.3.	<i>Troceado materia prima</i> .....	42
4.2.1.4.	<i>Secado de materia prima</i> .....	43
4.2.1.5.	<i>Molienda materia prima</i> .....	43
4.2.1.6.	<i>Tamizado de materia prima</i> .....	44
4.2.1.7.	<i>Extracción de extraíbles</i> .....	45
4.2.1.8.	<i>Secado 2</i> .....	45
4.2.1.9.	<i>Hidrolisis acida</i> .....	46
4.2.1.10.	<i>Filtrado</i> .....	47
4.2.1.11.	<i>Lavado 2</i> .....	48
4.2.1.12.	<i>Secado 3</i> .....	48
4.2.1.13.	<i>Hidrolisis alcalina</i> .....	49
4.2.1.14.	<i>Filtrado 2</i> .....	50
4.2.1.15.	<i>Lavado 3</i> .....	50
4.2.1.16.	<i>Secado 4</i> .....	51
4.2.1.17.	<i>Blanqueamiento</i> .....	52
4.2.1.18.	<i>Lavado 5</i> .....	52
4.2.1.19.	<i>Secado 5</i> .....	53

4.2.1.20.	<i>Molienda 2</i> .....	54
4.2.1.21.	<i>Tamizado 2</i> .....	54
<b>4.3.</b>	<b>Diseño de Equipos</b> .....	<b>55</b>
<b>4.3.1.</b>	<b><i>Diseño de la mesa de selección y lavado de materia prima</i></b> .....	<b>55</b>
4.3.1.1.	Volumen de la mesa.....	55
4.3.1.2.	Capacidad de la mesa.....	56
<b>4.3.2.</b>	<b><i>Diseño Picadora industrial</i></b> .....	<b>56</b>
4.3.2.1.	<i>Volumen de la picadora</i> .....	56
4.3.2.2.	<i>Radio de tanque</i> .....	56
4.3.2.3.	<i>Altura del tanque</i> .....	56
4.3.2.4.	<i>Velocidad Angular</i> .....	57
4.3.2.5.	<i>Longitud de las cuchillas</i> .....	57
4.3.2.6.	<i>Radio del rodete de cuchillas</i> .....	57
4.3.2.7.	<i>Energía de ruptura</i> .....	57
4.3.2.8.	<i>Velocidad de cuchilla</i> .....	57
4.3.2.9.	<i>Aceleración angular</i> .....	58
4.3.2.10.	<i>Masa de cuchilla móvil</i> .....	58
4.3.2.11.	<i>Fuerza centrífuga de la cuchilla</i> .....	58
4.3.2.12.	<i>Fuerza cortante</i> .....	58
4.3.2.13.	<i>Torque de cuchilla</i> .....	58
4.3.2.14.	<i>Potencia del motor</i> .....	58
<b>4.3.3.</b>	<b><i>Estufa de secado para la materia prima</i></b> .....	<b>59</b>
4.3.3.1.	<i>Volumen de materia prima que entra a la estufa</i> .....	59
4.3.3.2.	<i>Volumen del secador</i> .....	59
4.3.3.3.	<i>Cálculo de calor necesario para secar la materia prima</i> .....	59
4.3.3.4.	<i>Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar el agua</i> .....	60
4.3.3.5.	<i>Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor</i> .....	60
4.3.3.6.	<i>Cálculo del calor total de secado</i> .....	60

4.3.3.7.	<i>Cálculo del consumo del vapor.....</i>	60
<b>4.3.4.</b>	<b><i>Molino de martillos .....</i></b>	<b>60</b>
4.3.4.1.	<i>Determinación de la Potencia .....</i>	61
4.3.4.2.	<i>Cálculo de las velocidades de rotación del molino.....</i>	61
4.3.4.3.	<i>Determinación de la constante del molino.....</i>	61
4.3.4.4.	<i>Volumen de alimentación.....</i>	62
4.3.4.5.	<i>Cálculo del volumen de la carcasa del equipo.....</i>	62
4.3.4.6.	<i>Dimensiones del molino.....</i>	62
4.3.4.7.	<i>Cálculo de masa de los martillos.....</i>	62
4.3.4.8.	<i>Cálculo de la velocidad tangencial de los martillos .....</i>	63
4.3.4.9.	<i>Cálculo del factor dependiente de la velocidad de rotación de los martillos</i> <i>63</i>	
4.3.4.10.	<i>Cálculo del número de martillos.....</i>	63
4.3.4.11.	<i>Cálculo de la torsión ejercida por el motor de molino .....</i>	64
4.3.4.12.	<i>Dimensiones de la tolva de alimentación.....</i>	64
<b>4.3.5.</b>	<b><i>Tamices vibratorios .....</i></b>	<b>64</b>
4.3.5.1.	<i>Cálculo del volumen del tamiz.....</i>	65
4.3.5.2.	<i>Cálculo del diámetro del tamiz.....</i>	65
<b>4.3.6.</b>	<b><i>Recipiente industrial para Extracción de extraíbles.....</i></b>	<b>65</b>
4.3.6.1.	<i>Diámetro del tanque .....</i>	66
4.3.6.2.	<i>Altura del tanque .....</i>	66
4.3.6.3.	<i>Volumen del recipiente .....</i>	66
4.3.6.4.	<i>Capacidad de ocupación del tanque.....</i>	67
4.3.6.5.	<i>Altura de chaqueta de calentamiento de la marmita.....</i>	67
4.3.6.6.	<i>Diámetro de la chaqueta de calentamiento.....</i>	67
4.3.6.7.	<i>Cantidad de calor requerido.....</i>	67
<b>4.3.7.</b>	<b><i>Estufa de secado para la materia prima luego de extraíbles.....</i></b>	<b>67</b>
4.3.7.1.	<i>Volumen de materia prima que entra a la estufa .....</i>	67

4.3.7.2.	<i>Volumen del secador.....</i>	68
4.3.7.3.	<i>Cálculo de calor necesario para secar la materia prima .....</i>	68
4.3.7.4.	<i>Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar el agua.....</i>	68
4.3.7.5.	<i>Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor .....</i>	68
4.3.7.6.	<i>Cálculo del calor total de secado .....</i>	69
4.3.7.7.	<i>Cálculo del consumo del vapor.....</i>	69
<b>4.3.8.</b>	<b><i>Reactor para hidrolisis ácida .....</i></b>	<b>69</b>
4.3.8.1.	<i>Volumen del reactor .....</i>	69
4.3.8.2.	<i>Diámetro del tanque .....</i>	69
4.3.8.3.	<i>Altura del tanque .....</i>	70
4.3.8.4.	<i>Volumen del recipiente .....</i>	70
4.3.8.5.	<i>Capacidad de ocupación del tanque .....</i>	70
4.3.8.6.	<i>Agitación y potencia del motor .....</i>	70
4.3.8.7.	<i>Número de Reynolds y número de potencia .....</i>	71
4.3.8.8.	<i>Temperatura de diseño .....</i>	71
4.3.8.9.	<i>Presión de diseño.....</i>	71
4.3.8.10.	<i>Grosor de las paredes del reactor .....</i>	71
4.3.8.11.	<i>Diámetro externo del cilindro.....</i>	71
4.3.8.12.	<i>Tapa y fondo .....</i>	72
4.3.8.13.	<i>Diámetro externo de la tapa y fondo.....</i>	72
4.3.8.14.	<i>Altura de la tapa y fondo .....</i>	72
4.3.8.15.	<i>Altura del cilindro del reactor .....</i>	72
4.3.8.16.	<i>Cantidad de calor requerido.....</i>	72
4.3.8.17.	<i>Altura de chaqueta de calentamiento.....</i>	72
4.3.8.18.	<i>Diámetro de la chaqueta de calentamiento.....</i>	72
<b>4.3.9.</b>	<b><i>Estufa de secado para la pasta de celulosa luego de hidrolisis acida .....</i></b>	<b>73</b>
4.3.9.1.	<i>Volumen de materia prima que entra a la estufa .....</i>	73
4.3.9.2.	<i>Volumen del secador.....</i>	73

4.3.9.3.	<i>Cálculo de calor necesario para secar la materia prima</i>	73
4.3.9.4.	<i>Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar el agua</i>	73
4.3.9.5.	<i>Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor</i>	74
4.3.9.6.	<i>Cálculo del calor total de secado</i>	74
4.3.9.7.	<i>Cálculo del consumo del vapor</i>	74
<b>4.3.10.</b>	<b><i>Reactor para hidrolisis alcalina</i></b>	<b>74</b>
4.3.10.1.	<i>Volumen del reactor</i>	74
4.3.10.2.	<i>Diámetro del tanque</i>	75
4.3.10.3.	<i>Altura del tanque</i>	75
4.3.10.4.	<i>Volumen del recipiente</i>	75
4.3.10.5.	<i>Capacidad de ocupación del tanque</i>	75
4.3.10.6.	<i>Agitación y potencia del motor</i>	76
4.3.10.7.	<i>Número de Reynolds y número de potencia</i>	76
4.3.10.8.	<i>Temperatura de diseño</i>	76
4.3.10.9.	<i>Presión de diseño</i>	76
4.3.10.10.	<i>Grosor de las paredes del reactor</i>	77
4.3.10.11.	<i>Diámetro externo del cilindro</i>	77
4.3.10.12.	<i>Tapa y fondo</i>	77
4.3.10.13.	<i>Diámetro externo de la tapa y fondo</i>	77
4.3.10.14.	<i>Altura de la tapa y fondo</i>	77
4.3.10.15.	<i>Altura del cilindro del reactor</i>	77
4.3.10.16.	<i>Cantidad de calor requerido</i>	78
4.3.10.17.	<i>Altura de chaqueta de calentamiento</i>	78
4.3.10.18.	<i>Diámetro de la chaqueta de calentamiento</i>	78
<b>4.3.11.</b>	<b><i>Estufa de secado para la materia prima luego de hidrolisis alcalina</i></b>	<b>78</b>
4.3.11.1.	<i>Volumen de materia prima que entra a la estufa</i>	78
4.3.11.2.	<i>Volumen del secador</i>	78
4.3.11.3.	<i>Cálculo de calor necesario para secar la materia prima</i>	79

4.3.11.5.	<i>Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor</i> .....	79
4.3.11.6.	<i>Cálculo del calor total de secado</i> .....	79
4.3.11.7.	<i>Cálculo del consumo del vapor</i> .....	80
<b>4.3.12.</b>	<b><i>Tanque de blanqueo</i></b> .....	<b>80</b>
4.3.12.1.	<i>Volumen requerido</i> .....	80
4.3.12.2.	<i>Diámetro del tanque</i> .....	80
4.3.12.3.	<i>Altura del tanque</i> .....	80
4.3.12.4.	<i>Volumen del recipiente</i> .....	81
4.3.12.5.	<i>Capacidad de ocupación del tanque</i> .....	81
4.3.12.6.	<i>Agitación y potencia del motor</i> .....	81
4.3.12.7.	<i>Número de Reynolds y número de potencia</i> .....	81
<b>4.4.</b>	<b><i>Tanque de recepción de líquido residual de hidrolisis acida y alcalina</i></b> .....	<b>82</b>
<b>4.4.1.</b>	<b><i>Hidrolisis acida</i></b> .....	<b>82</b>
4.4.1.1.	<i>Volumen requerido</i> .....	82
4.4.1.2.	<i>Diámetro del tanque</i> .....	82
4.4.1.3.	<i>Altura del tanque</i> .....	82
4.4.1.4.	<i>Volumen del recipiente</i> .....	82
4.4.1.5.	<i>Capacidad de ocupación del tanque</i> .....	83
<b>4.4.2.</b>	<b><i>Hidrolisis alcalina</i></b> .....	<b>83</b>
4.4.2.1.	<i>Volumen requerido</i> .....	83
4.4.2.2.	<i>Diámetro del tanque</i> .....	83
4.4.2.3.	<i>Altura del tanque</i> .....	83
4.4.2.4.	<i>Volumen del recipiente</i> .....	83
4.4.2.5.	<i>Capacidad de ocupación del tanque</i> .....	84
<b>4.4.3.</b>	<b><i>Tanques mezcladores de reactivos para hidrolisis acida y alcalina</i></b> .....	<b>84</b>
4.4.3.1.	<i>Tanque mezclador para ácido sulfúrico al 0.4%</i> .....	84
4.4.3.2.	<i>Volumen requerido</i> .....	84
4.4.3.3.	<i>Diámetro del tanque</i> .....	84

4.4.3.4.	<i>Altura del tanque</i> .....	84
4.4.3.5.	<i>Volumen del recipiente</i> .....	84
4.4.3.6.	<i>Capacidad de ocupación del tanque</i> .....	85
4.4.3.7.	<i>Agitación y potencia del motor</i> .....	85
4.4.3.8.	<i>Número de Reynolds y número de potencia</i> .....	85
<b>4.4.4.</b>	<b><i>Tanque mezclador para hidróxido de sodio al 20%</i></b> .....	<b>86</b>
4.4.4.1.	<i>Volumen requerido</i> .....	86
4.4.4.2.	<i>Diámetro del tanque</i> .....	86
4.4.4.3.	<i>Altura del tanque</i> .....	86
4.4.4.4.	<i>Volumen del recipiente</i> .....	86
4.4.4.5.	<i>Capacidad de ocupación del tanque</i> .....	86
4.4.4.6.	<i>Agitación y potencia del motor</i> .....	87
4.4.4.7.	<i>Número de Reynolds y número de potencia</i> .....	87
<b>4.4.5.</b>	<b><i>Tanque mezclador para hipoclorito de sodio al 5%</i></b> .....	<b>87</b>
4.4.5.1.	<i>Volumen requerido</i> .....	87
4.4.5.2.	<i>Diámetro del tanque</i> .....	88
4.4.5.3.	<i>Altura del tanque</i> .....	88
4.4.5.4.	<i>Volumen del recipiente</i> .....	88
4.4.5.5.	<i>Capacidad de ocupación del tanque</i> .....	88
4.4.5.6.	<i>Agitación y potencia del motor</i> .....	88
4.4.5.7.	<i>Número de Reynolds y número de potencia</i> .....	89
<b>4.5.</b>	<b>Descripción del proceso industrial</b> .....	<b>89</b>
<b>4.6.</b>	<b>Comprobación de hipótesis</b> .....	<b>91</b>
4.6.1.	<i>Hipótesis 1</i> .....	91
4.6.2.	<i>Hipótesis 2</i> .....	91
4.6.3.	<i>Hipótesis 3</i> .....	91
4.6.4.	<i>Hipótesis 4</i> .....	92
<b>4.7.</b>	<b>Discusión de resultados</b> .....	<b>92</b>



<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>96</b>
<b>GLOSARIO</b>	
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Taxonomía del pasto elefante. ....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Composición química de diferentes edades de pasto elefante. ....	11
<b>Tabla 1-3:</b> Operacionalización de variables independientes. ....	18
<b>Tabla 2-3:</b> Operacionalización de variables dependiente. ....	20
<b>Tabla 3-3:</b> Matriz de consistencia. ....	21
<b>Tabla 4-3:</b> Esquema del experimento. ....	24
<b>Tabla 5-3:</b> Variables del proceso de hidrolisis alcalina. ....	28
<b>Tabla 6-3:</b> Variables del proceso de blanqueamiento. ....	29
<b>Tabla 1-4:</b> Componentes químicos de la fibra del pasto elefante ( <i>Pennisetum Purpureum</i> ). ....	31
<b>Tabla 2-4:</b> Resultado de rendimiento y pureza después de cada tratamiento. ....	32
<b>Tabla 3-4:</b> Resultados del porcentaje de des lignificación. ....	33
<b>Tabla 4-4:</b> Parámetros óptimos para obtención de celulosa microcristalina. ....	33
<b>Tabla 5-4:</b> Resumen estadístico del rendimiento obtenido al final de los tratamientos. ....	34
<b>Tabla 6-4:</b> Análisis de varianza del rendimiento obtenido al final de los tratamientos. ....	34
<b>Tabla 7-4:</b> Resultados de la prueba de Tukey aplicado al rendimiento obtenido al final de los tratamientos. ....	35
<b>Tabla 8-4:</b> Resumen estadístico del porcentaje de pureza de celulosa obtenido al final de los tratamientos. ....	36
<b>Tabla 9-4:</b> Análisis de varianza del porcentaje de pureza de celulosa obtenido al final de los tratamientos. ....	36
<b>Tabla 10-4:</b> Resultados de la prueba de Tukey aplicado al del porcentaje de pureza de celulosa obtenido al final de los tratamientos. ....	37
<b>Tabla 11-4:</b> Resultados físico-químicos del producto obtenido. ....	38
<b>Tabla 12-4:</b> Resultados de solubilidad. ....	38
<b>Tabla 13-4:</b> Resultados de solubilidad. ....	39
<b>Tabla 14-4:</b> Comparación de las propiedades de la celulosa microcristalina obtenida con las especificaciones establecidas por el Reglamento (CE) n°1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, con respecto a la celulosa microcristalina. ....	40
<b>Tabla 15-4:</b> Balance de masa de la etapa de inspección y selección. ....	41
<b>Tabla 16-4:</b> Balance de masa de la etapa de inspección y selección. ....	42
<b>Tabla 17-4:</b> Balance de masa de la etapa de troceado de la materia prima. ....	42
<b>Tabla 18-4:</b> Balance de masa de la etapa de secado de materia prima. ....	43
<b>Tabla 19-4:</b> Balance de masa de la etapa de molienda de la materia prima. ....	44
<b>Tabla 20-4:</b> Balance de masa de la etapa de tamizado de la materia prima. ....	44

<b>Tabla 21-4:</b> Balance de masa de la etapa de extracción de extraíbles.....	45
<b>Tabla 22-4:</b> Balance de masa de la etapa de secado luego de extraíbles.....	46
<b>Tabla 23-4:</b> Balance de masa de la etapa de hidrolisis ácida. ....	47
<b>Tabla 24-4:</b> Balance de masa de la etapa de filtrado de hidrolisis ácida. ....	47
<b>Tabla 25-4:</b> Balance de masa de la etapa de lavado de pulpa luego de hidrolisis ácida. ....	48
<b>Tabla 26-4:</b> Balance de masa de la etapa de secado de pulpa luego de hidrolisis ácida.....	49
<b>Tabla 27-4:</b> Balance de masa de la etapa de hidrolisis alcalina. ....	49
<b>Tabla 28-4:</b> Balance de masa de la etapa de filtrado luego de hidrolisis alcalina. ....	50
<b>Tabla 29-4:</b> Balance de masa de la etapa de lavado luego de hidrolisis alcalina. ....	51
<b>Tabla 30-4:</b> Balance de masa de la etapa de secado luego de hidrolisis alcalina. ....	51
<b>Tabla 31-4:</b> Balance de masa de la etapa de blanqueamiento de pulpa.....	52
<b>Tabla 32-4:</b> Balance de masa de la etapa de blanqueamiento de pulpa.....	53
<b>Tabla 33-4:</b> Balance de masa de la etapa secado de celulosa microcristalina. ....	53
<b>Tabla 34-4:</b> Balance de masa de la etapa de molienda de celulosa microcristalina. ....	54
<b>Tabla 35-4:</b> Balance de masa de la etapa de tamizado de celulosa microcristalina. ....	55
<b>Tabla 36-4:</b> Dimensiones de la mesa de selección y Lavado de materia prima. ....	55
<b>Tabla 37-4:</b> Parámetros del agitador del reactor de hidrolisis ácida. ....	70
<b>Tabla 38-4:</b> Parámetros del agitador del reactor de hidrolisis alcalina. ....	76
<b>Tabla 39-4:</b> Parámetros del agitador del reactor del tanque de blanqueo.....	81
<b>Tabla 40-4:</b> Parámetros del agitador del mezclador para ácido sulfúrico. ....	85
<b>Tabla 41-4:</b> Parámetros del agitador del mezclador de hidróxido de sodio. ....	86
<b>Tabla 42-4:</b> Parámetros del agitador del mezclador de hipoclorito de sodio. ....	88

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b> Esquema de los componentes químicos de los materiales lignocelulósicos no madereros.....	12
<b>Gráfico 2-2:</b> Esquema de obtención de celulosa microcristalina. ....	15
<b>Gráfico 1-3:</b> Diagrama de flujo de obtención de celulosa microcristalina. ....	30
<b>Gráfico 1-4:</b> Comparación del rendimiento de cada tratamiento. ....	35
<b>Gráfico 2-4:</b> Comparación del % de pureza de cada tratamiento.....	37
<b>Gráfico 3-4:</b> Vista de la celulosa microcristalina desde el microscopio. ....	39
<b>Gráfico 4-4:</b> Dimensiones de la mesa.....	55
<b>Gráfico 5-4:</b> Dimensiones de la tolva de alimentación.....	64
<b>Gráfico 6-4:</b> Dimensiones del recipiente del tanque.....	66
<b>Gráfico 7-4:</b> Proceso industrial de obtención de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum.....	90

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Resultados de los residuales del análisis de la varianza del análisis de los datos pureza y rendimiento de celulosa microcristalina en RStudio.

**ANEXO B:** Ensayo de laboratorio

**ANEXO C:** Plano Integral de la Planta de Producción de celulosa microcristalina.

**ANEXO D:** Esquema tecnológico de la Producción de celulosa microcristalina.

## RESUMEN

El objetivo fue diseñar un proceso industrial para la obtención de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum mediante la combinación de hidrólisis ácida y alcalina, se caracterizó la materia prima de trabajo mediante métodos físicos-químicos según las normas de la Asociación Técnica de la Industria del Papel y la Celulosa (TAPPI), con resultados de: humedad 79.2%, ceniza 13.30%, hemicelulosa 29.75%, lignina 9.53%, celulosa 37.26% y sustancias extraíbles 20.61% en porcentaje de peso. Para la obtención de la celulosa microcristalina se propuso un diseño multifactorial de dos factores donde se varió las concentraciones de hidróxido de sodio de 10%, 20% y 30% en la hidrólisis alcalina con las concentraciones de hipoclorito de sodio (2% y 5%) para el blanqueo de la pulpa, tomando como variable de respuesta el rendimiento y pureza de celulosa. El tratamiento que presentó mayor eficacia en rendimiento (37.95%) y pureza de porcentaje de celulosa (74.74%) según los resultados del ANOVA y prueba TUKEY, fue el tratamiento de 20% de hidróxido de sodio y 5% de hipoclorito de sodio al 5%. Las propiedades físico-químicas del producto final son: ceniza 1.8%, pureza de celulosa 74.74%, humedad 4.3%, pH 6.8, el tamaño de partícula 0.1050 mm, insolubilidad en CH<sub>3</sub>COOH 20%, NaClO 5%, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 15%, HCl 10%, etanol 98% y agua, según sus características no puede ser considerado grado alimenticio o farmacéutico, pero se deja abierta la posibilidad de estudio en campos industriales diferentes a los mencionados. El diseño del proceso se realizó en función de 500 kg/día, de tipo continuó, obteniendo 21.64 kg/día de celulosa microcristalina.

**Palabras clave:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <CELULOSA MICROCRISTALINA>, <PASTO ELEFANTE (Pennisetum Purpureum)>, <PROCESO INDUSTRIAL>



Firmado electrónicamente por:  
LUIS  
ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS



30-05-2023

0035-DBRA-UPT-IPEC-2023

## ABSTRACT

The objective was to design an industrial process to obtain microcrystalline cellulose from *Pennisetum Purpureum* through a combination of acid and alkaline hydrolysis. The raw material was characterized by physical-chemical methods according to the standards of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), with results of moisture 79.2%, ash 13.30%, hemicellulose 29.75%, lignin 9.53%, cellulose 37.26% and extractable substances 20.61% in weight percentage. To obtain microcrystalline cellulose, a two-factor multifactorial design was proposed in which sodium hydroxide concentrations of 10%, 20%, and 30% in alkaline hydrolysis were varied with sodium hypochlorite concentrations (2% and 5%) for pulp bleaching, taking cellulose yield and purity as response variables. The treatment that presented the highest efficiency in yield (37.95%) and cellulose purity (74.74%) according to the ANOVA and TUKEY test results, was the treatment with 20% sodium hydroxide and 5% sodium hypochlorite at 5%. The physicochemical properties of the final product are ash 1.8%, cellulose purity 74.74%, moisture 4.3%, pH 6.8, particle size 0.1050 mm, insolubility in CH<sub>3</sub>COOH 20%, NaClO 5%, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 15%, HCl 10%, ethanol 98% and water, according to its characteristics it cannot be considered food or pharmaceutical grade, but the possibility of study in industrial fields other than those mentioned is left open. The process design was carried out in the function of 500 kg/day, continuous type, obtaining 21.64 kg/day of microcrystalline cellulose.

Keywords: <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <MICROCRYSTALLINE CELLULOSE>, <ELEFANT GRASS (*Pennisetum Purpureum*)>, <INDUSTRIAL PROCESS>.

## **CAPÍTULO I**

### **1. INTRODUCCIÓN**

Actualmente, el mundo produce alrededor de 200 mil toneladas de materiales de celulosa microcristalina por año. La celulosa microcristalina se produce a partir de algodón, madera y sulfato de celulosa para procesamiento químico con un alto contenido de alfa celulosa y un bajo contenido de lignina y hemicelulosas, aproximadamente el 70% de celulosa microcristalina se utiliza en las industrias alimentarias y farmacéuticas (Romero *et al.* 2013). Los forrajes y pastos constituyen el alimento básico de consumo en el sector agropecuario, su material lignocelulósico presenta un gran potencial debido a su composición química, esta biomasa lignocelulósica presente en hojas y tallos pueden utilizarse como materia prima para la producción de celulosa microcristalina, pero hasta ahora se ha prestado poca atención a esta trayectoria de recuperación en forrajes.

Los pocos datos disponibles en la literatura muestran el aislamiento del bagazo de caña de azúcar (García-garcía *et al.* 2013), en Desechos Agrícolas del Cambur (Romero *et al.* 2013), fibra de estopa de coco (Pineda 2018), en pseudotallo de banano (Aroca y Estrada 2015), en madera y algodón (Carchi 2014) entre otros, pero no se encuentra referencia bibliográfica de la obtención a partir del pasto de la especie *Pennisetum Purpureum*. En este sentido, esta investigación pretende diseñar un proceso industrial para obtener celulosa microcristalina mediante la combinación de métodos de hidrólisis (ácida y alcalina) a partir del pasto elefante (*Pennisetum Purpureum*), de modo que pueda ser aplicada en una gran variedad de campos tanto científicos como tecnológicos considerando su versatilidad en las diferentes industrias, que al implementarse el diseño por la Asociación Agropecuaria “Maconta Arriba” logrará aportar al desarrollo local de la comunidad en la que se localiza.

#### **1.1. Problema de Investigación**

##### **1.1.1. Situación Problemática**

En las últimas décadas existe gran interés en la utilización de materiales lignocelulósicos por su composición química y poder energético, entre las áreas más importantes de uso y aplicación se destacan (Rodríguez *et al.*, 1990; FAO, 2001):

- a. Obtención de productos que sustituyan la utilización parcial o total de reservas fósiles a partir de fuentes renovables.



- b. Obtención de polímeros y derivados químicos a partir de materiales residuales de bosques, cultivos o industria maderera.

La madera es principalmente el material lignocelulósico más empleado en la fabricación de diversos polímeros, muebles, pasta papelera entre otros. El 19% de la madera extraída mundialmente se destina para usos energéticos y el 42% se emplea en la fabricación de pastas de celulosa y subproductos. El incremento en la demanda de esta clase de materias primas ocasiona problemas tanto económicos como medioambientales, por tal motivo es importante investigar otras fuentes de obtención de material lignocelulósico (Jiménez *et al.*, 1989; Rodríguez *et al.*, 1989). A causa del desarrollo industrial a nivel mundial, la tarea más importante en esta área no es solo aumentar el volumen de materiales producidos, sino también aumentar la eficiencia de los materiales que se crean y sobre todo ampliar su gama. Junto a esto, la reducción de los recursos naturales no renovables utilizados en la producción de diversos materiales crea déficit y eleva el coste de sus materias primas.

Durante los últimos años la ecología y el ambiente se encuentran presentes en todos los ámbitos, el desarrollo sustentable involucra disposiciones orientadas a la administración eficiente y responsable de los recursos naturales para la preservación de estos. En este sentido, una de las fuentes prometedoras de materias primas puede ser la biomasa lignocelulósica presente en pastos y forrajes que son muy poco valorados presentando un gran porcentaje de fibra vegetal (Cortes, 2011). La celulosa micro cristalina es un derivado de la celulosa y se ha convertido en una materia prima de gran importancia para la elaboración de una gran cantidad de productos, principalmente utilizada por la industria farmacéutica como envoltura o diluyente en capsulas, en la industria cosmética, también es representativa en la industria de alimentos en y otras más en la que se comporta como un diluyente o mejora propiedades de resistencia (De la Cruz, *et al.*, 2016).

En la provincia de Manabí, ciudad de Portoviejo, específicamente en la comunidad “Maconta Arriba”, la Asociación Agropecuaria Maconta Arriba busca el desarrollo local mediante la utilización de materias vegetales lignocelulósicas presentes en la zona, siendo una de ellas el pasto elefante, sin embargo, por falta de conocimientos técnicos sobre el desarrollo de productos utilizando material vegetal no se ha podido establecer un proceso adecuado para obtener beneficios económicos y ayudar a los campesinos que conforman la comunidad. En este sentido, esta investigación pretende diseñar un proceso industrial para obtener celulosa microcristalina mediante la combinación de los métodos de hidrólisis (ácida y alcalina) a partir del pasto elefante (*Pennisetum Purpureum*), de modo que pueda ser aplicada en una gran variedad de campos considerando su versatilidad en las diferentes industrias, que al implementarse el diseño en la comunidad de Maconta Arriba logrará aportar a su desarrollo.

### **1.1.2. Formulación del problema**

¿El diseño de un proceso industrial permitirá conocer la prefactibilidad técnica en la obtención de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum a gran escala?

### **1.1.3. Problemas Específicos**

¿Qué métodos físico-químicos permitirán caracterizar la materia prima utilizada para obtener celulosa microcristalina?

¿Qué variables y parámetros permitirán obtener un mayor rendimiento de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum en los ensayos de laboratorio?

¿Cuáles serían los cálculos ingenieriles necesarios para el escalado industrial del proceso?

¿Qué propiedades de acuerdo a las normativas vigentes deberá tener la celulosa microcristalina para validar el diseño del proceso?

## **1.2. Justificación del proyecto**

La creciente preocupación por el medio ambiente, junto con las propiedades de apertura de la celulosa microcristalina en las diferentes industrias, están aumentando e impulsando su demanda en el mundo. Además, la comprensión de que muchos recursos no son renovables está desplazando la demanda del mercado hacia un mayor uso de productos biológicos. El uso de productos orgánicos y sostenibles innovadores se está convirtiendo en una tendencia que tiene un impacto significativo en las decisiones comerciales y la inversión corporativa en todo el mundo. La celulosa microcristalina es un producto de la destrucción química de la celulosa, caracterizada por un alto grado de pureza y un alto contenido de una parte ordenada de celulosa con una orientación cristalográfica de macromoléculas (Philip, 2002), se trata de un tejido biológicamente degradable de celulosa obtenido a partir de fibra vegetal.

Es decir, es por esencia un recurso biorenovable generado a partir de material vegetal con características únicas logrando una gran innovación partiendo de un recurso sustentable. Los forrajes y pastos constituyen el alimento básico de consumo en el sector agropecuario, su material lignocelulósico presenta un gran potencial debido a su composición química, esta biomasa lignocelulósica presente en hojas y tallos pueden utilizarse como materia prima para la producción de celulosa microcristalina (López, *et al*, 2008), pero hasta ahora se ha prestado poca atención al proceso de recuperación en forrajes.

El mercado mundial de celulosa microcristalina en 2017 ascendió a unos 900 millones de dólares, para 2025 se pretende que alcance los 1.451 millones de dólares, con un aumento del 5,5% de 2018 al 2025 (Microcrystalline Cellulose Market, 2018). América del Norte es el mayor consumidor de este producto (> 45%), seguida de Asia y Europa. La región de Asia y el Pacífico muestra un consumo acelerado de celulosa microcristalina, mientras que América del Norte y Europa está creciendo a un ritmo más modesto (Cellulose Powder Market, 2018). De acuerdo con el análisis presentado por Global de Celulosa Microcristalina 2017-2025, uno de los principales factores que inciden en el mercado de celulosa microcristalina es la creciente demanda de su uso en las industrias alimentaria y farmacéutica por sus características y excelentes propiedades.

El uso de celulosa microcristalina en alimentos y productos farmacéuticos ha sido aprobado por GRAS FDA (Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos) como seguro, a pesar que en la industria farmacéutica presenta mayores aplicaciones, la última tendencia que está ganando impulso en el mercado es la creciente demanda de alimentos procesados y bajos en grasas. El aumento de la demanda de alimentos procesados y alimentos bajos en grasas impulsará enormemente el crecimiento del mercado mundial de celulosa microcristalina hasta el 2025 (BAC Reports, 2019). Es utilizada también en la producción de plásticos, refractarios cerámicos y porcelana, como estabilizador de pinturas acuosas y emulsiones diversas, para obtener materiales filtrantes, como aglutinante en la producción de papel seco y telas no tejidas (Azarov, 2010). En el Ecuador no existe alguna empresa que se dedique a la obtención de celulosa microcristalina incluso la mayor parte de la materia prima utilizada por las industrias es importada, incluyendo principios activos, excipientes y material de empaque.

Debido a que el *Pennisetum Purpureum* es una especie forrajera de aprovechable material lignocelulósico, utilizado para corte, adaptada a condiciones tropicales y un amplio rango de distribución de las lluvias y fertilidad de los suelos, incluyendo los suelos ácidos de baja fertilidad natural (Herrera, 2006; Escobar *et al.*, 2013), por estas condiciones de adaptabilidad se reproduce fácilmente en la comunidad de Maconta Arriba, por lo que se propone el diseño de un proceso para obtener un producto con valor agregado (celulosa microcristalina) a partir de una especie de pasto, considerando parámetros y variables de operación, destinándolo para Asociación Agropecuaria “Maconta Arriba” principalmente por su potencial en lo que es la materia prima que al implementarlo ayudará al desarrollo local y productivo, permitiendo generar fuentes de empleo y mejorar las condiciones de vida de sus integrantes.

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

- Diseñar un proceso industrial para la obtención de celulosa microcristalina mediante combinación de hidrólisis ácida y alcalina a partir del *Pennisetum Purpureum* para la Asociación Agropecuaria Maconta Arriba.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Realizar el diagnóstico del material vegetal (*Pennisetum Purpureum*) mediante su caracterización de acuerdo a las normas del Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI).
- Seleccionar las variables y los parámetros extractivos más eficientes a nivel de laboratorio que permitan un mayor rendimiento en la obtención de celulosa microcristalina.
- Efectuar los cálculos y el diseño ingenieril para el proceso de producción de celulosa microcristalina.
- Validar el diseño del proceso de obtención de celulosa microcristalina a través de la caracterización del producto final según métodos físico-químicos de acuerdo a normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) y del Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI).

### **1.4. Hipótesis**

#### ***1.4.1. Hipótesis General***

- Se podrá diseñar un proceso industrial para obtener celulosa microcristalina a partir del *Pennisetum Purpureum* mediante combinación de métodos de hidrólisis ácida y alcalina partiendo de datos de laboratorio.

#### ***1.4.2. Hipótesis Específicas***

- Los métodos físico-químicos de acuerdo a las normas TAPPI permitirán caracterizar la materia prima (*Pennisetum Purpureum*).
- Al modificar variables y parámetros de operación a nivel de laboratorio se logrará un mayor

rendimiento en la obtención de celulosa microcristalina.

- Se podrá realizar los cálculos ingenieriles para escalar el proceso de obtención de celulosa microcristalina a partir de los datos obtenidos del laboratorio.
- Se validará el diseño del proceso de obtención de celulosa microcristalina mediante la caracterización físico-química del producto final según normativas.

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la Investigación**

Existen gran abundancia de antecedentes sobre estudios realizados sobre la obtención de celulosa microcristalina. Las principales investigaciones que sirvieron de inicio en el estudio de las propiedades y tecnología de la celulosa microcristalina, son las investigaciones de Orlando Battista, que publicó estudios sobre su estructura y propiedades obtenida por hidrólisis de celulosa de algodón (Battista, 1962). Los estudios muestran que es un material celulósico en polvo que consiste en partículas que son agregados de microcristales de celulosa que contienen cientos y miles de macromoléculas, degradadas hasta el llamado grado "limitante" de polimerización. Estos agregados tienen una alta relación longitud-espesor (Battista, 1965). El valor del grado "limitante" de polimerización depende principalmente del tamaño de los microcristales de la celulosa inicial y, en menor medida, de las condiciones para la obtención (Kugach, 2006).

En las investigaciones de (Galbraich, 1996; Akbarova, 2005) se muestra que el grado "límite" de polimerización de la celulosa microcristalina está en el rango de 30 a 350. Depende del tipo de celulosa, por ejemplo, algodón 200 - 300, madera 120 - 180, fibra de viscosa celulosa 30 - 50. En la última década han surgido gran variedad de investigaciones, que abarcan distintas problemáticas y proponen aportes enormes hacia el camino de la explotación de la biomasa lignocelulósica, donde la utilización de especies de pastos y forrajeras han permitido obtener valor agregado y sobre todo han generado una química verde por los productos finales generados, sustituyendo a las principales materias primas.

En la investigación presentada por (Cardona, *et al*, 2012) analizan el uso del pasto elefante como material lignocelulósico para la producción de bioetanol, concluyendo que tiene un rendimiento de entre 360 – 400 ton/ha por año y en base a la concentración de celulosa y hemicelulosa se observan rendimientos teóricos de 466,9 L/ha de etanol. Según (Natagaima, 2018) en su estudio obtuvo celulosa a partir de residuos de poda de pastos, sometiendo esta biomasa a reaccionar con liquido iónico cloruro de 1-butil-3-metilimidazolio [BMIM][Cl], dada investigación presenta una alternativa de extracción de material lignocelulósico utilizando solventes más amigables con el ambiente.

En 2014, Romero Viloría, realizaron un estudio para obtener de celulosa micro cristalina a partir de Desechos Agrícolas del Cambur (*musa sapientum*), su objetivo fue sintetizar celulosa micro cristalina a partir del pseudotallo y pinzote de la planta de cambur, la investigación tiene un impacto ecológico al eliminar una fuente de contaminación y económico ya que utiliza un desecho para obtener un nuevo producto con un alto valor agregado. La técnica adoptada en la investigación fue viable ya que demostró un alto rendimiento comparándola con la celulosa micro cristalina comercial que se encuentra en el mercado (Viloría, *et al.*, 2014).

En el 2013, (García-García, 2013), exponen los resultados de su estudio denominado obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar para usos farmacéuticos, realizando una combinación de hidrolisis tanto alcalina como acida, permitiendo obtener fracciones de celulosa microcristalina con un grado de polimerización entre 180-200. Entre otros datos disponibles en la literatura muestran el aislamiento de celulosa microcristalina en la fibra de estopa de coco (Pineda, *et al*, 2018), en pseudotallo de banano (Aroca, *et al*, 2015), en madera y algodón (Latif *et al.* 2007), en bambú (Yacelga, 2018).

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. *Diseño de procesos industriales***

En cualquier empresa, al lanzar un nuevo tipo de producto a la producción, o aumentar la producción, los servicios de ingeniería y tecnología de la planta se enfrentan al problema del diseño, la puesta en marcha y el lanzamiento de nuevas instalaciones de producción: líneas automáticas, áreas de mecanizado, equipos especiales, etc. Una de las primeras etapas del diseño es la elaboración de esquemas tecnológicos.

#### **2.2.1.1. *Esquema tecnológico de producción***

Una lista secuencial de las principales operaciones y procesos de procesamiento tecnológico de materias primas con una indicación de los modos de procesamiento aplicados, su selección y justificación para la producción de productos es una de las etapas clave. La segunda etapa es la selección del equipo utilizado, cuyo rendimiento corresponde a la capacidad máxima de producción de la empresa proyectada (taller, sitio). En esta etapa, es necesario calcular el equipo. La selección y el cálculo del número de unidades de equipo es una etapa de diseño importante, de la cual dependen los indicadores técnicos y económicos del proyecto y la eficiencia económica de la actividad productiva de la empresa: la calidad de los productos, la productividad laboral, las ganancias, la producción y rentabilidad.

### 2.2.1.2. Escalado de laboratorio

El laboratorio constituye la primera unidad de investigación en la que se determinan los métodos de síntesis o procesamiento y se establecen las condiciones para obtener los mejores resultados. El laboratorio afirma o rechaza las hipótesis generadas del conocimiento previo y de la literatura y se obtienen datos que permiten enriquecer la información sistematizada. Además se obtiene información para la realización de evaluaciones económicas preliminares determinando diversas propiedades físico-químicas, empleadas en los cálculos ingenieriles, la formulación y comprobación de modelos matemáticos (González-Castellanos 2000).

El escalado se realiza con los siguientes criterios:

- Uso de equipos con los mismos principios operativos en las distintas etapas del escalado.
- Identificación de indicadores críticos de la calidad de las materias primas y productos terminados.
- Parámetros críticos del proceso tecnológico de producción.
- Recopilación de datos adecuados sobre los procesos y la calidad del producto fabricado.

La ampliación del proceso facilita determinar los parámetros óptimos del proceso tecnológico para la producción industrial, permitiendo la transferencia de tecnología de producción de un pequeño volumen de un lote de laboratorio de un producto a un volumen industrial.

### 2.2.1.3. Escalado de procesos químicos

Escalar un proceso es transformarlo de su escala de investigación a escala industrial. Ejemplo; en un laboratorio se desarrolla un producto por medio de una reacción química usando equipos de laboratorio. El nuevo producto puede llevarse al mercado mediante el escalamiento; analizando las condiciones de reacción y los factores de influencia que permiten determinar los equipos necesarios y proponer el proceso de producción en masa del producto (Anaya-Durand y Pedroza-Flores 2008). El desarrollo de procesos químicos y su transferencia del laboratorio a la producción industrial están plagados de una serie de problemas relacionados con el equipo, la seguridad y los factores financieros.

Esto requiere no solo experiencia y datos empíricos, sino también otra información, como las características del equipo, información sobre la termodinámica del proceso, mezcla y transferencia de masa, así como datos sobre la cinética de reacción y los riesgos potenciales. El escalamiento del proceso también depende de la transferencia y disipación de calor. La realización u optimización de un escalado de procesos químicos puede implicar la utilización de nuevas técnicas de producción o tecnologías de separación (Applus 2018).



### 2.2.2. *Pasto elefante (Pennisetum Purpureum)*

El pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) es una planta perenne del trópico con una gran producción de biomasa que se adapta a diferentes condiciones edafoclimáticas, esto se debe a la estabilidad en el rendimiento de los genotipos en ambientes diferentes (A., Larissa *et. all.* 2016). El Pasto Elefante crece formando matas de un 1 m de diámetro máximo con número variable de sus macollos dependiendo de las condiciones del cultivo, las matas se expanden por crecimiento de los nudos o por medio de tallos subterráneos cortos y carnosos. Los tallos contienen internudos de hasta 3 cm de diámetro. Las hojas son lanceoladas, de 30 a 120 cm de largo y 1 a 5 cm de ancho, en zonas altas el corte se suele realizar cada 120 días, pero en zonas bajas cada 45 días. Tiene productividad, tanto como alimento para el ganado como para su uso para la obtención de biocombustible, su producción de materia seca por hectárea año, alrededor de 40 – 50 toneladas. En la tabla 1 se observa la taxonomía de este pasto (Argentino y Ben 2004).

**Tabla 1-2:** Taxonomía del pasto elefante.

<b>Reino</b>	Plantae
<b>Orden</b>	Poales
<b>Familia</b>	Poaceae
<b>Subfamilia</b>	Panicoideae
<b>Género</b>	Pennisetum
<b>Especie</b>	<i>P. purpureum</i>
<b>Nombre científico</b>	<i>Pennisetum Purpureum</i>

**Fuente:** (Bemhaja 2000)

**Realizado:** Briones, Javier 2021

#### 2.2.2.1. *Caracterización del forraje*

En la Tabla 1- 2 se presenta una recopilación de datos de diferentes fuentes bibliográficas sobre la composición química del pasto elefante.

**Tabla 2-2:** Composición química de diferentes edades de pasto elefante.

Edad/Días	PB%	FND%	FAD%	LAD%	CZ%	MS%	RMS (t/ha)
14	22.6	38.9	25.1	2.82	19.7	11.6	0.48
28	18.5	50.9	32.9	3.37	18.9	12.7	2.22
42	14.9	57.5	37.9	4.22	19.2	16.5	6.50
56	13.0	58.5	39.3	5.47	17.9	29.5	14.80
70	11.2	63.5	45.4	6.01	15.9	35.5	22.80

**PB**=proteína bruta; **FND**=fibra neutro detergente; **FAD**=fibra ácido detergente; **LAD**=lignina ácido detergente; **CZ**=cenizas de la materia seca; **MS**= materia seca; **RMS**= rendimiento de materia seca.

**Fuente:**(Urribarri, *et al.* 2004; González *et al.* 2011; van Cleef *et al.* 2012)

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

Los datos de la tabla 2-2, demuestran que esta especie forrajera, inicia su crecimiento con un elevado valor de proteína bruta, un rendimiento bajo de materia seca, un contenido de bajo de lignina, pero a medida que el pasto madura el rendimiento de materia seca y demás componentes de la pared celular (fibra neutro detergente, fibra ácido detergente y lignina ácido detergente) se incrementan; según comportamientos reportados por (González *et al.* 2011) y (Caceres, *et al.* 1988).

### 2.2.3. Fibras lignocelulósicas no madereras

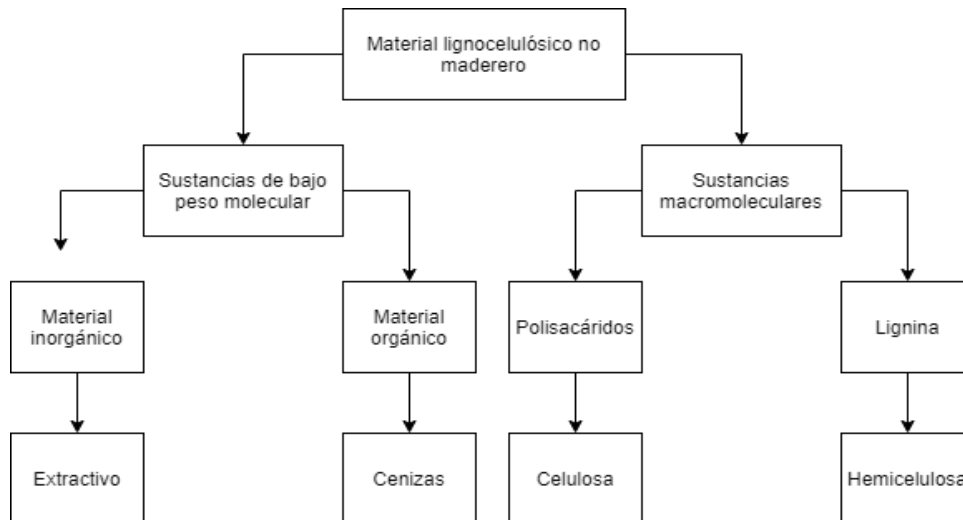
Los materiales lignocelulósicos están formados por celulosa, hemicelulosa y lignina en relación de 4:3:3 variando según las diferentes especies, debido a su origen renovable, biodegradabilidad y sus posibilidades de reciclaje, son una fuente idónea de materiales poliméricos de interés industrial (Locane 2019). Los materiales naturales vegetales no maderero mayormente utilizados en la producción de fibras son:

- Hemp, kenaf, lino, yute, abacá.
- Residuos agrícolas: paja de trigo, maíz, paja de arroz, bagazo de caña y sisal
- hierbas silvestres: pastos, bambú, hierba elefante, etc.

Las principales dificultades al trabajar con este tipo de materiales son su recolección y el almacenaje, este tipo de plantas ofrecen una gran cantidad de cualidades que al explotarlas correctamente podrían desarrollarse productos innovadores. Si se comparan las fibras madereras con las de plantas no madereras por lo regular tienen un menor contenido en lignina y mayor contenido de sílice y cenizas, siendo el contenido de celulosa igual en ambos materiales vegetales. El uso de estas fibras a nivel industrial se enfoca en obtención de productos textiles y papeleros, pero la posibilidad de usar fibras naturales en otras aplicaciones no se ha desarrollado extensivamente (Locane 2019).

### 2.2.3.1. Composición química de las fibras naturales lignocelulósicas no madereras

Los componentes químicos que conforman las fibras naturales lignocelulósicas no madereras se detallan en el grafico 1-2.



**Gráfico 1-2:** Esquema de los componentes químicos de los materiales lignocelulósicos no madereros.

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

Los constituyentes mayoritarios de fibras lignocelulósicas son la celulosa, hemicelulosas y la lignina, pero existen productos que se encuentran en menor proporción como los extraíbles por solventes orgánicos: las proteínas, el almidón y otros productos inorgánicos. La composición química de las fibras depende de la fuente vegetal de procedencia, pero de manera general están compuestas de celulosa, entre un 40 y 50%, entre un 10 y 30% de lignina y de 20 a 30% de hemicelulosas (Locane 2019).

### 2.2.4. Productos de material lignocelulósico natural no maderero

#### 2.2.4.1. Celulosa

Es uno de los polímeros naturales más comunes; el componente principal de las paredes celulares de las plantas, que determina la resistencia mecánica y la elasticidad de los tejidos vegetales. Por lo tanto, el contenido de celulosa de las semillas de algodón es del 97 al 98%, en los tallos de las plantas de lino (lino, ramio, yute) del 75 al 90%, en la madera del 40 al 50%, cañas, cereales y girasol. 30–40%. Las propiedades fisicoquímicas de la celulosa se deben a la estructura de sus macromoléculas, que consta de residuos de D-glucosa, formando una estructura topológica lineal; numerosos enlaces de hidrógeno entre el grupo hidroxilo de las macromoléculas, grado de polimerización. Como resultado del impacto (destrucción de la reacción) de grupos funcionales,

reticulación de cadenas, reordenamientos intramoleculares), se modifica la estructura de los biopolímeros y éstos adquieren nuevas propiedades valiosas que permiten encontrar áreas previamente desconocidas. de su uso. Actualmente, los materiales de celulosa se utilizan activamente para crear una variedad de micro y nanoestructuras.

Además del hecho de que la celulosa se utiliza para la producción de papel, también utilizan su muy útil propiedad de esterificación con varios ácidos orgánicos e inorgánicos. En el curso de tales reacciones, se forman ésteres, que han encontrado aplicación en la industria. Durante la propia reacción química no se rompen los enlaces que unen los fragmentos de la molécula de celulosa, pero se obtiene un nuevo compuesto químico con el grupo éter -COOR-. Uno de los productos de reacción importantes es el acetato de celulosa, que se forma por la interacción del ácido acético (o sus derivados, por ejemplo, acetaldehído) y la celulosa.

Este compuesto químico se usa ampliamente para fabricar fibras sintéticas como la fibra de acetato. Otro producto útil es el trinitrato de celulosa. Está formado por la nitración de celulosa con una mezcla de ácidos: sulfúrico concentrado y nítrico. El trinitrato de celulosa se usa ampliamente en la fabricación de polvo sin humo (piroxilina). También existe el dinitrato de celulosa, que se utiliza para fabricar algunos tipos de plásticos y vidrios orgánicos.

#### *2.2.4.2. Hidrolisis de la celulosa*

El aislamiento de la celulosa a partir de materiales naturales se basa en la acción de reactivos que disuelven o destruyen los componentes no celulósicos contenidos en los tejidos vegetales (proteínas, grasas, ceras, resinas, lignina y polisacáridos). Los métodos de aislamiento dependen del tipo de material vegetal, los principales son:

**Hidrolisis ácida** – Las zonas amorfas de la celulosa son más susceptibles a la hidrólisis ácida, de manera que facilita la ruptura de los enlaces o-glucosídicos, liberando los cristales individuales. Frecuentemente son utilizados los ácidos sulfúrico y clorhídrico, las suspensiones coloidales producidas por hidrólisis con ácido sulfúrico son más estables. Esto se puede explicar por el hecho de que los CW de celulosa tienen una importante densidad de carga en su superficie, como consecuencia de la inserción de los grupos sulfato en la superficie de los CW induciendo una carga negativa, generando una repulsión entre partículas de manera que la suspensión ni precipita ni flocula (Carchi 2014).

**Hidrolisis alcalina** – Actúa igual que la hidrolisis ácida, provocando disminución en el grado de polimerización de la celulosa. Ocurre a altas temperaturas y con álcalis fuertes o si la celulosa presenta grupos oxidados (Odor Chávez 2008). El tratamiento con solución de hidróxido de sodio

(NaOH) produce un hinchamiento de la biomasa, aumentando el área superficial interna, un descenso de la cristalinidad, lo que ocasiona la separación de las uniones entre la lignina y los carbohidratos y una rotura de la estructura de la lignina. La efectividad del tratamiento depende del porcentaje de lignina, ya que con un contenido en lignina mayor al 26% (Rodríguez Valiente 2016).

#### *2.2.4.3. Derivados de la celulosa*

Los diferentes derivados de la celulosa presentan diversas aplicaciones, en la industria alimentaria, se destacan la carboximetilcelulosa, la hidroxipropilcelulosa, la metilcelulosa, la hidro-xipropilmetilcelulosa y la celulosa microcristalina obtenida por hidrólisis ácida de fibras vegetales. A excepción de esta última, todas las demás proceden de una modificación química de la glucosa por esterificación logrando una macromolécula celulósica hidrosoluble que le confiera propiedades espesantes. La glucosa se obtiene por la hidrólisis con hidróxido de sodio 18 % de la pulpa de madera purificada. Las propiedades son muy variables de un derivado a otro y dependen, entre otras, del grado de sustitución (Alimentacion-Sana 2013).

#### *2.2.5. Celulosa microcristalina*

La celulosa microcristalina (MCC) es una materia orgánica de micro celulosa origen vegetal, polvo blanco. Este Polímero natural resulta de la destrucción de la celulosa bajo la influencia de reactivos químicos. Como resultado del procesamiento, se obtiene un material con un alto contenido de moléculas ordenadas cristalográficamente. La estructura de la celulosa microcristalina difiere de la estructura de los materiales celulósicos tradicionales fibrosos y en polvo. Es mucho más denso, más polimerizado, contiene un gran porcentaje de formaciones cristalinas; la estructura de las fibras de celulosa se destruye casi por completo en él, presenta las siguientes propiedades:

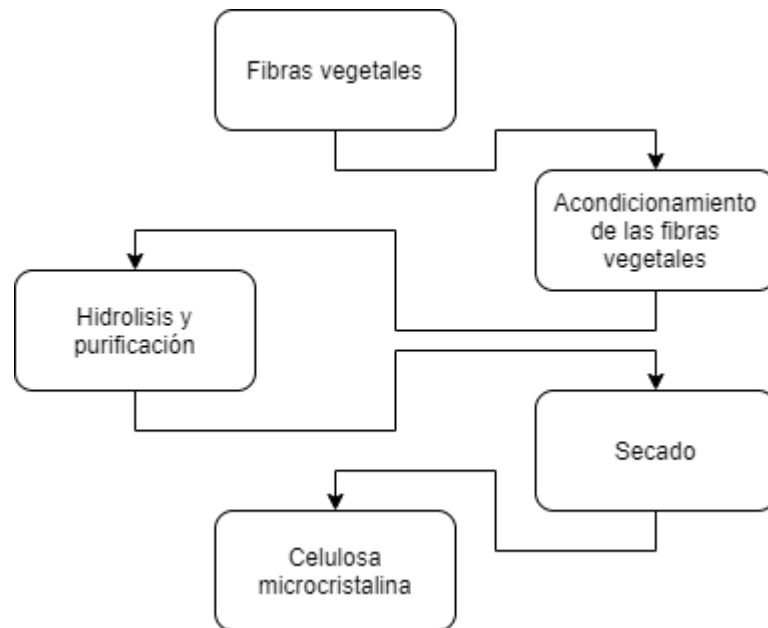
- Insípida e inodoro;
- Tiene una alta higroscopicidad;
- Insoluble en agua;
- Insoluble en disolventes orgánicos;
- Puede ser tratado térmicamente;
- Difiere en la resistencia química;
- Fisiológicamente inerte;
- No se digiere ni se absorbe en el cuerpo;
- Química y bacteriológicamente pura;

Es un material ecológico que no contiene impurezas nocivas, inofensivo para humanos y animales. Se produce celulosa microcristalina de varios tipos, con partículas cuyos tamaños varían

de 1 nm a 400 nm. El tamaño de partícula depende de la materia prima y del método para producir MCC. Los microcristales de celulosa pueden ser aciculares o granulares, dependiendo de la celulosa de la que estén hechos, la celulosa microcristalina es similar a la fibra natural que se encuentra en las verduras y frutas, por lo que es muy utilizada en la industria alimentaria.

#### 2.2.5.1. Obtención de celulosa microcristalina

En datos bibliográficos de investigaciones de (Ferrer 2013; Aroca, *et al*, 2015; Arroyo Rosas 2008; Pineda 2018; Bolio-López *et al*. 2011) coinciden en que el procedimiento aplicado para la obtención de celulosa microcristalina consiste en remover los componentes no celulósicos asociados a la celulosa por tratamientos de tipo químico, así la celulosa purificada es sometida a hidrólisis bajo condiciones controladas, seguido de diferentes lavados de la sustancia obtenida y posteriormente se somete a un secado. Ver gráfico 2-2.



**Gráfico 2-2:** Esquema de obtención de celulosa microcristalina.

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

La materia prima utilizada en obtención de celulosa microcristalina a nivel industrial es la madera y el algodón, mediante procesos de hidrólisis utilizando ácidos minerales diluidos. Otras fuentes potenciales de celulosa son: cáscaras de coco, bagazo de caña de azúcar, ramio, paja de trigo, arroz, yute, lino, fibras de lino y de cáscara de soja; esta variedad explica que las propiedades del producto sean diferentes en cuanto a cristalinidad, contenido de humedad, superficie porosa, peso molecular, entre otras (Bastidas 2016).

## **CAPÍTULO III**

### **3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Metodología**

##### ***3.1.1. Tipo y Diseño de la Investigación***

El tipo de investigación para el presente estudio es exploratorio-descriptivo, ya que, mediante referencias bibliográficas sobre los métodos de hidrólisis en fibras vegetales, se establecerá una formulación para la extracción de celulosa microcristalina a nivel de laboratorio, para posteriormente utilizando fundamentos de operaciones unitarias y cálculos ingenieriles diseñar un escalado industrial del proceso, esto se determinará por medio de parámetros de laboratorio con ayuda de experimentos y ensayos, es un tema que no ha sido suficientemente abordado o estudiado permitiendo ampliar el estudio de esta clase de pasto para esta y otras áreas de interés. Además, la intención es indagar métodos y procedimientos de una situación específica hasta conseguir un producto de calidad. Igualmente, es de diseño experimental debido a las condiciones y características del estudio a realizarse.

##### ***3.1.2. Método de investigación***

Se considera al método analítico-experimental, ya que está dirigido a establecer la caracterización del producto obtenido implementando los métodos de hidrólisis ácida y alcalina en la fibra del *Pennisetum Purpureum* para obtener celulosa microcristalina, este método permite empezar de conceptos generales hasta lograr el objetivo deseado, utilizando fundamentos de operaciones unitarias, análisis instrumental y sobre todo el principio básico de la Ingeniería Química. Mientras que para el diseño del proceso se requiere conceptos de Ingeniería de Plantas y Cálculos Básicos para un desarrollo adecuado de la planta que se busca diseñar. Siendo el método un modelo del método científico que se basa en la experimentación y la lógica analítica, que junto a la observación de fenómenos y sus análisis estadísticos permitirá concretar la investigación planteada

##### ***3.1.3. Enfoque de la investigación***

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, utiliza la recolección y el análisis de datos para dar respuestas a las preguntas planteadas en la investigación y probar las hipótesis establecidas previamente y confía en la medición numérica (Martinez 2011).

Basado en la medición de uno o más atributos del fenómeno descrito con los cuales se realizará su respectiva interpretación y análisis.

### **3.2. Identificación de las variables**

#### **3.2.1. *Variable dependiente***

- Tiempo de hidrolisis
- Temperatura de hidrolisis
- pH de hidrolisis

#### **3.2.2. *Variable independiente***

- Rendimiento de celulosa microcristalina
- Propiedades de celulosa microcristalin.



### 3.2.3. Operacionalización de variables

**Tabla 1-3:** Operacionalización de variables independientes.

Operacionalización de variables independientes.

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Tiempo de hidrolisis	Es la sucesión de rupturas de los enlaces de las moléculas de la pared vegetal del pasto elefante durante la hidrolisis	Tiempo de hidrolisis básica	Porcentaje de microcelulosa	Masa de microcelulosa obtenida, mediante hidrólisis básica.	Continuo	Gravimetría	Balanza analítica	>20%
		Tiempo de hidrolisis acida	Porcentaje de celulosa	Masa de celulosa obtenida, mediante hidrólisis Ácida	Continuo	Gravimetría	Balanza analítica	>35%
Temperatura de hidrolisis	Grado o nivel térmico que se logra alcanzar durante el proceso de hidrolisis	Temperatura de hidrolisis básica	Porcentaje de microcelulosa	Masa de microcelulosa obtenida, mediante hidrólisis básica.	Continuo	Gravimetría	Balanza analítica	>20%
		Temperatura de hidrolisis acida	Porcentaje de celulosa	Masa de celulosa obtenida, mediante hidrólisis Ácida	Continuo	Gravimetría	Balanza analítica	>35%
pH de hidrolisis	Grado de acidez o basicidad del proceso de Hidrolisis	pH de hidrolisis básica	Porcentaje de microcelulosa	Masa de microcelulosa obtenida, mediante hidrólisis básica.	Continuo	Gravimetría	Balanza analítica	>20%
		pH de hidrolisis acida	Porcentaje de celulosa	Masa de celulosa obtenida, mediante hidrólisis Ácida	Continuo	Gravimetría	Balanza analítica	>35%

Realizado por: Briones, Javier, 2021

VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Rendimiento de celulosa microcristalina	Masa de celulosa microcristalina obtenida, mediante hidrólisis Ácida	Rendimiento de celulosa microcristalina	Rendimiento superior al 20%	La recuperación de celulosa microcristalina en porcentajes superiores al 20% dan rentabilidad al método empleado	Continuo	Gravimetría	Balanza analítica	> 20%
Propiedades de celulosa microcristalina	Son las propiedades que permiten determinar el tipo de producto obtenido	Propiedades de celulosa microcristalina	Color	Color obtenido del producto final (celulosa microcristalina) según la percepción visual	Nominal	Análisis organoléptico	N/A	Blanco o semiBlanca
			Olor	Olor obtenido del producto final (celulosa microcristalina) según la sensación que produce el sentido del olfato	Nominal	Análisis organoléptico	N/A	Sin olor
			Tamaño	Tamaño de partícula o cristal de celulosa microcristalina	Continua	Tamizaje	Tamiz	> 10 µm
			Ph	El pH del líquido de una disolución de celulosa microcristalina al 10 % en agua	Continua	Potenciometría	Potenciómetro	5,5 - 7

Pureza	Porcentaje de reactivo puro de celulosa microcristalina mayor al 70% en la masa total	Continua	Método de Kurschner y Hoffer	de Balanza analítica, equipo baño maría, desecador.	>70%
--------	---	----------	------------------------------	---	------

---

**Tabla 2-3:** Operacionalización de variables dependiente.

*Realizado por: Briones, Javier, 2021*

### 3.2.4. Matriz de consistencia

**Tabla 3-3:** Matriz de consistencia.

Formulación del problema		Objetivo General			Hipótesis General		
¿El diseño de un proceso industrial permitirá conocer la prefactibilidad técnica en la obtención de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum a gran escala?		Diseñar un proceso industrial para la obtención de celulosa microcristalina mediante combinación de hidrólisis ácida y alcalina a partir del Pennisetum Purpureum para la Asociación Agropecuaria Maconta Arriba.			Se podrá diseñar un proceso industrial para obtener celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum mediante combinación de métodos de hidrólisis ácida y alcalina partiendo de datos de laboratorio.		
Preguntas directrices	Objetivo Específico	Hipótesis Específica	Variables	Indicadores	Técnicas	Instrumentos	
¿Qué métodos físico-químicos permitirán caracterizar la materia prima utilizada para obtener celulosa microcristalina?	Realizar el diagnóstico del material vegetal ( <i>Pennisetum Purpureum</i> ) mediante su caracterización de acuerdo a las normas del Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI).	Los métodos físico-químicos de acuerdo a las normas TAPPI permitirán caracterizar la materia prima ( <i>Pennisetum Purpureum</i> )	<i>Pennisetum Purpureum</i>	Porcentaje de celulosa	de TAPPI T 201 m-54	Estufa Balanza analítica Desecador	
				Porcentaje de hemicelulosa	de TAPPI T-212	Estufa Balanza analítica Desecador	
				Porcentaje de lignina	TAPPI -222	Estufa Balanza analítica Desecador	
¿Qué variables y parámetros permitirán obtener un mayor rendimiento de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum en los ensayos de laboratorio?	Seleccionar las variables y los parámetros extractivos más eficientes a nivel de laboratorio que permitan un mayor rendimiento en la obtención de celulosa microcristalina.	Al modificar variables y parámetros de operación a nivel de laboratorio se logrará un mayor rendimiento en la obtención de celulosa microcristalina	Tiempo de hidrolisis	de Porcentaje de celulosa	de Gravimetría	Balanza analítica	
				de Porcentaje de microcelulosa	de Gravimetría	Balanza analítica	
			pH de hidrolisis	de Porcentaje de celulosa	de Gravimetría	Balanza analítica	
				de Porcentaje de microcelulosa	de Gravimetría	Balanza analítica	
			Temperatura de Hidrolisis	de Porcentaje de celulosa	de Gravimetría	Balanza analítica	

					Porcentaje de microcelulosa	Gravimetría	Balanza analítica	
			Rendimiento de nanocelulosa		Rendimiento superior al 20%	Gravimetría	Balanza analítica	
¿Cuáles serían los cálculos ingenieriles necesarios para el escalado industrial del proceso?	Efectuar los cálculos y el diseño ingenieril para el proceso de producción de celulosa microcristalina.	Se podrá realizar los cálculos ingenieriles para escalar el proceso de obtención de celulosa microcristalina a partir de los datos obtenidos del laboratorio.	Tiempo de hidrolisis		Porcentaje de celulosa	Gravimetría	Balanza analítica	
					Porcentaje de nanocelulosa	Gravimetría	Balanza analítica	
				pH de hidrolisis		Porcentaje de Celulosa	Gravimetría	Balanza analítica
						Porcentaje de nanocelulosa	Gravimetría	Balanza analítica
				Temperatura de hidrolisis		Porcentaje de Celulosa	Gravimetría	Balanza analítica
¿Qué propiedades de acuerdo a las normativas vigentes deberá tener la celulosa microcristalina para validar el diseño del proceso?	Validar el diseño del proceso de obtención de celulosa microcristalina a través de la caracterización físico-química del producto final según normativas.	Se validará el diseño del proceso de obtención de celulosa microcristalina mediante la caracterización físico-química del producto final según normativas.	Propiedades de celulosa microcristalina		Color	Análisis organoléptico	N/A	
					Olor	Análisis organoléptico	N/A	
					Tamaño	Tamizaje	Tamiz	
					pH	Potenciometría	Potenciómetro	
					Pureza	Método de Kurschner y Hoffer	Balanza analítica, equipo baño maría, desecador.	

Realizado por: Briones, Javier, 2021

### **3.3. Diseño de la investigación**

#### **3.3.1. Población de estudio**

La población de estudio será finita y estará conformada por muestras de pasto elefante de la especie *Pennisetum Purpureum*, familia Poaceae, cultivado en la parcela número 2 cuya área referencial es de 300 m<sup>2</sup> ubicada en los predios de la Asociación Agropecuaria Maconta Arriba, del recinto Maconta Arriba, ciudad de Portoviejo, Provincia de Manabí – Ecuador las cuales permitirán llevar a cabo la experimentación.

#### **3.3.2. Unidad de análisis**

La unidad de análisis corresponde a la fibra vegetal del pasto elefante llegado a su madurez (60-70 días) en la que se llevará a cabo los distintos tipos de hidrolisis (básica y ácida) hasta la obtención de celulosa microcristalina y a partir de datos obtenidos del laboratorio se proyectará el diseño industrial.

#### **3.3.3. Selección de la muestra**

Considerando que la muestra a emplearse para la presente investigación se encuentra en los predios de la Asociación Agropecuaria “Maconta Arriba”, dado área posee alrededor de 2500 especies de tipo *Pennisetum Purpureum*, debido a esto se realizará un muestreo al azar en forma sistemática (se toman a intervalos regulares a lo largo de una o varias transectas) y estratificadas (la pastura es dividida en áreas con similares características). Se evaluará muestras de tallo del pasto mencionado, el investigador tomará en consideración áreas donde las plantas presenten similares características, madurez y en cuanto a su calidad, que no presente manchas, arañazos, ni afectaciones por algún tipo de enfermedad o insecto, según la técnica de muestreo y parámetros de calidad de pastos y forrajes (Bruno *et al.* 1995).

#### **3.3.4. Técnica de recolección de datos**

Para la recolección primaria de datos se usarán ensayos experimentales y bitácoras que permitan anotar cada uno de las formulaciones de los procesos durante la investigación.

Por otra parte, los datos obtenidos, se registrarán en hojas de Excel para su posterior interpretación y análisis en un paquete estadístico. Los parámetros óptimos y variables determinadas a nivel de laboratorio serán interpretados para su escalado industrial. En cuanto a los datos secundarios se recolectarán de revisiones bibliográficas en artículos científicos, libros y revistas científicas.

### 3.3.5. Tratamiento y diseño experimental

En la investigación se utilizará un Diseño Multifactorial de Dos Factores para la realización de las pruebas de laboratorio, lo que permitirá escoger las variables y parámetros para la elaboración del proceso industrial de acuerdo al procedimiento que obtenga un mayor rendimiento y pureza de celulosa microcristalina. El modelo estadístico que sigue este diseño experimental se detalla a continuación:

Nº de repeticiones = 2, Nº de tratamientos = 18, con un nivel de significancia (5 %).

**Tabla 4-3:** Esquema del experimento.

Tratamiento	Muestra	Concentración de	Concentración de	Concentración de
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)	NaOH (%)	NaClO (%)
		<i>t</i> = 60 min; <i>T</i> = 60°C	<i>t</i> = 120 min; <i>T</i> = 60°C	<i>t</i> = 300 min; <i>T</i> = 25°C
T1	1	0.4	10	5
	2	0.4	10	5
	3	0.4	10	5
T2	1	0.4	20	5
	2	0.4	20	5
	3	0.4	20	5
T3	1	0.4	30	5
	2	0.4	30	5
	3	0.4	30	5
T4	1	0.4	10	2
	2	0.4	10	2
	3	0.4	10	2
T5	1	0.4	20	2
	2	0.4	20	2
	3	0.4	20	2
T6	1	0.4	30	2
	2	0.4	30	2
	3	0.4	30	2

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

### 3.4. Procedimiento Experimental

Para el procedimiento experimental de la investigación se utilizaron 2000 gramos de tallo de pasto elefante, las cuales se sometieron a los procesos que se indican en el gráfico 1-3, para su transformación en celulosa microcristalina.

### **3.4.1. Caracterización de la materia prima**

Los análisis físico-químicos se realizaron en combinación de las normas ANSI (American Society for Testing and Materials) y las normas TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industries) con adaptaciones. Antes de realizar algún tratamiento químico al material vegetal esta pasará por una etapa de pretratamiento.

#### **3.4.1.1. Pretratamiento de la materia prima**

El pretratamiento consiste en la clasificación y lavado más profundo con agua destilada. Posteriormente el material es secado al sol para eliminar el exceso de humedad por el lavado, luego se secaron hasta peso constante en un horno a 100 °C aproximadamente de 2 a 3 horas y se almacenaron en fundas herméticas.

#### **3.4.1.2. Determinación de extraíbles**

El análisis se realiza de acuerdo a la norma TAPPI T-207, que indica obtener 10 g de muestra seca libre de humedad la cual se transfirió a un matraz de 250 ml, añadiendo 100 ml de agua destilada caliente y se sometió a un baño de agua hirviendo (Pineda 2018).

Cálculo del porcentaje de extraíbles en agua caliente como sigue:

$$\% \text{ extraíbles en agua caliente} = \left[ \left( \frac{A - B}{A} \right) \right] * 100$$

Dónde:

A = peso inicial de la muestra seca, en g.

B = peso de la muestra de ensayo después de extracción, seca en g.

#### **3.4.1.3. Determinación de humedad**

El método consiste en un crisol que va a contener la cantidad de muestra necesaria para el ensayo, se secó a 105 °C ± 0.5 por 2 h, luego se enfrió en un desecador por 20 minutos, se pesó y anoto el dato para luego introducirlo nuevamente al horno a 105 °C ± 0.5 por 1 h, se dejó enfriar en un desecador hasta peso constante. Se pesó 2 gramos de muestra anhidra y se colocó en el crisol previamente tratado, se secó la muestra durante 2 horas a 105 °C ± 0.5, se esperó que enfriara en un desecador por 20 minutos, anotando el peso obtenido, se colocó nuevamente la muestra en el horno por 1 hora y se introdujo en el desecador hasta peso constante, de acuerdo a la norma ASTM D4442-92 (Fonseca 2006).



Cálculo del porcentaje de humedad:

$$\% \text{ humedad} = \left\{ \frac{[100 - (P.L. - P.C.)]}{P.I.} \right\} * 100$$

Dónde:

P.L. = Peso de la muestra libre de humedad.

P.C. = Peso crisol.

P.I. = Peso de la muestra inicial.

#### 3.4.1.4. *Determinación de cenizas*

El análisis consiste en secar el crisol en el horno a  $525\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25$  en un promedio de 30 a 60 minutos, se enfría en un desecador para toma el dato de su peso, se repite el proceso con la muestra libre de humedad y se carboniza para luego tomar el dato de su peso, de acuerdo a la norma TAPPI T-211.

Calcular el porcentaje de cenizas como sigue:

$$\% \text{ Cenizas} = \left( \frac{A}{B} \right) * 100$$

Dónde:

A = peso de cenizas, g.

B = peso de muestra anhidra, g.

#### 3.4.1.5. *Determinación hemicelulosa*

El análisis se realizó de acuerdo a la norma TAPPI T-212, se pesa 1 gramo de muestra seca libre de humedad, se coloca en un vaso precipitado de 200 ml, se agrega 100 ml de una solución de NaOH al 1 % y se agito con una varilla de vidrio, luego se tapa el vaso con un vidrio reloj y se lo coloca en un baño de agua hirviendo entre  $97$  y  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 1 hora, con agitación constante. Pasado el tiempo se filtra la muestra y se lava con 100 ml de agua destilada caliente, luego con 25 ml de ácido acético al 10% para luego dejarlo en reposo por 1 minuto, luego se repite el paso con 25 ml de ácido acético al 10 % para finalmente lavar la muestra con de agua destilada caliente hasta pH neutro. Se seca la muestra a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3$  hasta peso constante (Pineda 2018).

Calcular el porcentaje de hemicelulosa como sigue:

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \left( \frac{A - B}{A} \right) * 100$$

Dónde:

A = peso inicial de la muestra seca libre de humedad, g.

B = peso de la muestra seca después de la extracción, g.

#### 3.4.1.6. Determinación de lignina

El análisis se lleva a cabo de acuerdo a la norma TAPPI -222, consiste en colocar 1 gramo de muestra seca libre de humedad en un vaso de precipitación de 100 ml y añadir 15 ml de ácido sulfúrico al 72 %, agitar por 2 horas a 20 °C. Luego se pasa la muestra a un envase que contenga 565 ml de agua destilada, luego se somete a calentamiento en un balón con un condensador para reflujo por 4 horas. Decantar hasta la separación de las dos fases.

Se filtra con un crisol filtrante de porosidad media y se lava con agua destilada caliente hasta pH neutro, secar a 100 °C ±3 y pesar hasta peso constante.

Calcular el porcentaje de lignina como sigue:

$$\% \text{ Lignina} = \left( \frac{A}{W} \right) * 100$$

Dónde:

A = peso de muestra luego de la extracción, g.

W = peso de muestra seca, g.

#### 3.4.1.7. Determinación de celulosa

El análisis se realizó por la norma TAPPI T 201 m-54, consiste en colocar 2 gramos del material seco en un matraz y añadir 30 ml de hipoclorito de sodio al 96% dejándolo actuar por 6 horas, luego se lava sucesivamente con 50 ml de agua destilada, 50 ml de solución al 3% de ácido sulfúrico, 50 ml de agua destilada y 50 ml de solución al 2 % de sulfito de sodio. Luego, se filtra al vacío con 150 ml de agua destilada, el residuo se seca a 103°C en la estufa hasta peso constante.

$$\% \text{ Celulosa} = \left( \frac{p2}{p1} \right) * 100$$

Dónde:

P1 = peso de muestra seca, g.

B = peso de muestra anhidra, g.

### 3.4.2. *Obtención de celulosa microcristalina*

#### 3.4.2.1. *Extraíbles en agua caliente*

Dada técnica emplea para eliminar compuestos orgánicos (taninos, almidones entre otros), consiste en colocar el material vegetal en un baño de agua destilada a 80°C por una hora, posteriormente se filtra el material y se lleva a secar hasta peso constante, según la norma T 207 om-93.

#### 3.4.2.2. *Hidrolisis ácida*

Consiste en una maceración ácida del material vegetal obtenido luego de la técnica de extraíbles en agua caliente. Se tomó como referencia en método mejorado y aplicado según (Pineda 2018) el cual se fundamenta del método de (Aroca y Estrada 2015) donde se trabajó con una concentración muy baja de ácido sulfúrico de 0.4% por 60 minutos a una temperatura de 60°C y se precede a secar.

#### 3.4.2.3. *Hidrolisis alcalina*

En esta etapa del proceso se pretende hacer reaccionar 20 gramos de muestra seca obtenida de la etapa de hidrolisis acida, con tres concentraciones diferentes de una solución de hidróxido calentándola hasta los 60 °C por 120 min. Cumplido el tiempo requerido se lava y se seca hasta peso constante. Para la hidrólisis alcalina se prepararon tres soluciones de soda caustica de diferente concentración cada una tal y como se detalla en la Tabla 5-3.

**Tabla 5-3:** Variables del proceso de hidrolisis alcalina.

Etapa del proceso	Variables del proceso		
	Temperatura °C	Concentración %	Tiempo de reacción min
Hidrolisis alcalina	60	10	120
		20	
		30	

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

#### 3.4.2.4. *Blanqueamiento*

El blanqueamiento con NaClO se realiza a concentraciones diferentes 2% y 5 % a una temperatura de 25°C por un tiempo de 300 minutos sin agitación. Se pretende evaluar de manera visual el proceso gradual de blanqueo a medida que transcurre el tiempo. En la Tabla 6-3 se puede observar las variables del proceso.

**Tabla 6-3:** Variables del proceso de blanqueamiento.

<b>Etapa del proceso</b>	<b>Variables del proceso</b>		
Blanqueamiento	Temperatura °C	Concentración %	Tiempo de reacción min
	25	2	300
		5	

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

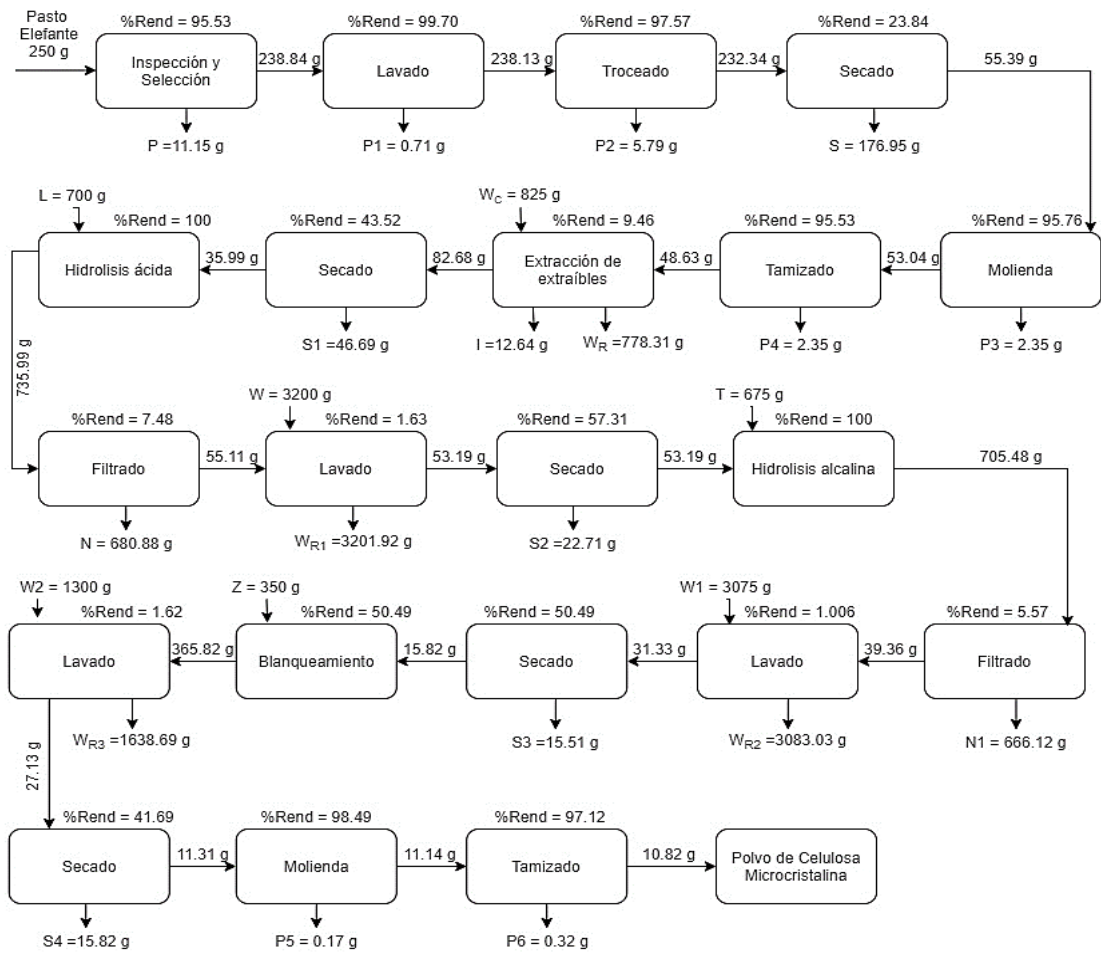
#### 3.4.3. *Normativa de calidad referente a las propiedades de la celulosa microcristalina*

Los análisis físico químicos se realizarán de acuerdo a las normas INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) para la identificación cualitativa de celulosa y en combinación con las normas ANSI (American Society for Testing and Materials) y TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industries) se caracterizará la materia prima y se determinará las propiedades del producto final, para su comparación con las especificaciones establecidas por el Reglamento (CE) n°1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, con respecto a la celulosa microcristalina, las normas se detallan a continuación:

- INEN 2527 (Determinación cualitativa de celulosa)
- INEN 2527 (Determinación de solubilidad)
- NTE INEN 0384:1978 (Determinación de pH)
- TAPPI T-211 (Determinación de cenizas)
- TAPPI T-236 y TAPPI 236 cm-85 (Determinación del grado de des lignificación)
- ASTM D4442-92 (Determinación de humedad)
- Método de Kurschner y Hoffer (Determinación de celulosa)

#### 3.4.4. *Diagrama de flujo del proceso*

En el gráfico 1-3 se encuentra las etapas en el laboratorio que pasó el tallo del pasto elefante hasta la obtención de la celulosa microcristalina, los parámetros de trabajo se encuentran en la tabla 4-3.



**Gráfico 1-3:** Diagrama de flujo de obtención de celulosa microcristalina.

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados experimentales

##### 4.1.1. Caracterización de la materia prima

El diagnóstico del material vegetal (*Pennisetum Purpureum*) se realizó mediante su caracterización según las normas del Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), donde se analizó: humedad, ceniza, hemicelulosa lignina y sustancias extraíbles en porcentaje de peso como se observan en la tabla 1-4.

**Tabla 1-4:** Componentes químicos de la fibra del pasto elefante (*Pennisetum Purpureum*).

<b>Materia Prima</b>	<b>Humedad %</b>	<b>Ceniza %</b>	<b>Hemicelulosa %</b>	<b>Lignina %</b>	<b>Extraíbles %</b>	<b>Celulosa %</b>
Fibra del pasto elefante ( <i>Pennisetum Purpureum</i> )	79.2	13.30	29.75	9.53	20.61	37.26

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

Los resultados reportados en la tabla son parcialmente semejantes a los reportados por (Segura, *et al.*, 2008; van Cleef *et al.* 2012; Cazco Barba 2017) y dentro de los márgenes del tipo de material vegetal.

##### 4.1.2. Obtención de celulosa microcristalina

La obtención se llevó a cabo bajo diferentes tratamiento y muestras, los cuales se encuentran contemplado en la tabla 2 -4 de cada tratamiento se evaluó la pureza y el rendimiento del producto final obtenido.

**Tabla 23-4:** Resultado de rendimiento y pureza después de cada tratamiento.

<i>Tratamiento</i>	<i>Muestra</i>	<i>Peso de muestra a seca (gr)</i>	<i>Concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (%)</i>	<i>Concentración de NaOH (%)</i>	<i>Concentración de NaClO (%)</i>	<i>Peso de producto final (gr)</i>	<i>Rendimiento (%)</i>	<i>Pureza (%)</i>
			<i>t = 60 min;</i>	<i>t = 120 min;</i>	<i>t = 300 min;</i>			
			<i>T = 60°C</i>	<i>T = 60°C</i>	<i>T = 25°C</i>			
<i>T1</i>	<i>1</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>5</i>	<i>3.33</i>	<i>33.3</i>	<i>54.7</i>
	<i>2</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>5</i>	<i>3.454</i>	<i>34.54</i>	<i>52.37</i>
	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>5</i>	<i>3.516</i>	<i>35.16</i>	<i>51.35</i>
<i>T2</i>	<i>1</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>5</i>	<i>3.754</i>	<i>37.54</i>	<i>74.34</i>
	<i>2</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>5</i>	<i>3.946</i>	<i>39.46</i>	<i>75.63</i>
	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>5</i>	<i>3.685</i>	<i>36.85</i>	<i>74.27</i>
<i>T3</i>	<i>1</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>5</i>	<i>2.254</i>	<i>22.54</i>	<i>72.23</i>
	<i>2</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>5</i>	<i>2.06</i>	<i>20.6</i>	<i>67.79</i>
	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>5</i>	<i>2.485</i>	<i>24.85</i>	<i>70.74</i>
<i>T4</i>	<i>1</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>2</i>	<i>3.624</i>	<i>36.24</i>	<i>42.15</i>
	<i>2</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>2</i>	<i>3.243</i>	<i>32.43</i>	<i>45.78</i>
	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>2</i>	<i>3.678</i>	<i>36.78</i>	<i>43.18</i>
<i>T5</i>	<i>1</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>2</i>	<i>3.734</i>	<i>37.34</i>	<i>67.67</i>
	<i>2</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>2</i>	<i>3.593</i>	<i>35.93</i>	<i>70.37</i>
	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>2</i>	<i>3.945</i>	<i>39.45</i>	<i>69.23</i>
<i>T6</i>	<i>1</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>2</i>	<i>2.967</i>	<i>29.67</i>	<i>62.57</i>
	<i>2</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>2</i>	<i>3.084</i>	<i>30.84</i>	<i>68.47</i>
	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>2</i>	<i>2.775</i>	<i>27.75</i>	<i>65.24</i>

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

#### 4.1.3. Grado de deslignificación

El grado de deslignificación resulta ser mayor mientras su número Kappa sea más bajo, es un indicador para determinar el contenido residual de lignina en las pastas de celulosa, como se observa en la tabla 3 – 4, todas las pastas de celulosa obtenidas en los diferentes tratamientos presentan porcentaje de lignina en su composición lo que puede provocar oxidación de su estructura.

Al aumentar la concentración de hidróxido de sodio en la hidrólisis alcalina disminuye las concentraciones de lignina en los tratamientos.

**Tabla 3-4:** Resultados del porcentaje de deslignificación.

<i>Tratamiento</i>	<i>Peso de muestra seca (gr)</i>	<i>Concentración de H2SO4 (%)</i>	<i>Concentración de NaOH (%)</i>	<i>Concentración de NaClO (%)</i>	<i>Media de No Kappa</i>
		<i>t = 60 min; T = 60°C</i>	<i>t = 60 min; T = 60°C</i>	<i>t = 60 min; T = 60°C</i>	
<i>T1</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>5</i>	<i>20.45</i>
<i>T2</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>5</i>	<i>14.26</i>
<i>T3</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>5</i>	<i>11.35</i>
<i>T4</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>10</i>	<i>2</i>	<i>22.6</i>
<i>T5</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>2</i>	<i>15.85</i>
<i>T6</i>	<i>10</i>	<i>0.4</i>	<i>30</i>	<i>2</i>	<i>13.36</i>

Elaborado: Briones, Javier 2021

#### 4.1.4. Análisis estadístico de resultados obtenidos

La descripción estadística se realizó aplicando paquetes informáticos estadísticos de carácter gratuito (Excel y RStudio), los cuales permitieron realizar el análisis de la varianza y partiendo de este se aplicó la prueba Tukey HSD, para las tabulaciones de: rendimiento y porcentaje de pureza. Las medias calculadas y las pruebas estadísticas aplicadas determinaron que el tratamiento con mayor eficacia fue el 2 cuyos parámetros se observan en la tabla 4 – 4.

**Tabla 4-4:** Parámetros óptimos para obtención de celulosa microcristalina.

<i>Parámetros</i>	<i>Ácido Sulfúrico (H2SO4)</i>	<i>Hidróxido de Sodio (NaOH)</i>	<i>Hipoclorito de Sodio (NaClO)</i>
<i>Concentración (%)</i>	<i>0.4</i>	<i>20</i>	<i>5</i>
<i>Tiempo (min)</i>	<i>60</i>	<i>120</i>	<i>300</i>
<i>Temperatura (°C)</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>25</i>

Elaborado: Briones, Javier 2021

##### 4.1.4.1. Rendimiento de los tratamientos

El rendimiento del producto final obtenido en los diferentes tratamientos se determinó bajo la siguiente fórmula:

$$\%rendimiento_{\text{producto final}} = \frac{\text{Peso del producto seco final}}{\text{Peso de la muestra seca sin ningun tratamiento}} * 100\%$$

(Ec.7)



La tabla 5 – 4 muestra un resumen de los resultados obtenidos por el análisis estadístico aplicado, donde se observa que el tratamiento 2 arroja un 37.95% de rendimiento y el tratamiento 5 un 37.57 % en el producto final obtenido según sus medias, ambos tratamientos presentan una media de sus promedios casi similares.

**Tabla 5-4:** Resumen estadístico del rendimiento obtenido al final de los tratamientos.

Grupos	Cuenta	Suma	Rendimiento promedio del producto final %	Varianza
Tratamiento 1	3	103.00	34.3333	0.8969
Tratamiento 2	3	113.85	37.9500	1.8291
Tratamiento 3	3	67.99	22.6633	4.5270
Tratamiento 4	3	105.45	35.1500	5.6217
Tratamiento 5	3	112.72	37.5733	3.1384
Tratamiento 6	3	88.26	29.4200	2.4339

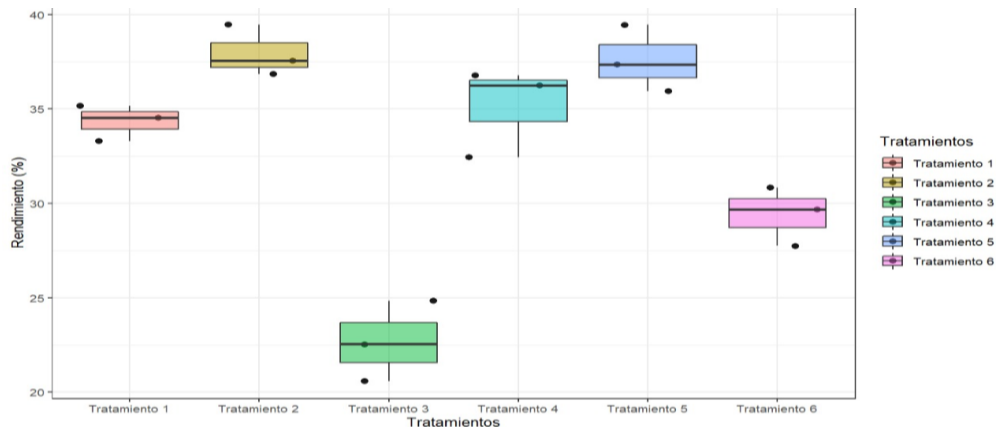
**Elaborado:** Briones, Javier 2021

El análisis de varianza realizado, permitió la interacción de los diferentes rendimientos obtenidos en los tratamientos, en la tabla 6 – 4 se detallan los estadísticos el cual reporta diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05^{**}$ ) y que las medias de las repeticiones para cada tratamiento son diferentes. El grafico 1 – 4 muestra el reporte de estas diferencias.

**Tabla 6-4:** Análisis de varianza del rendimiento obtenido al final de los tratamientos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	514.02965	5	102.80593	33.43	1.2104E-06	3.10587524
Dentro de los grupos	36.8942	12	3.074516667	80		
Total	550.92385	17				

**Elaborado:** Briones, Javier 2021



**Gráfico 1-4:** Comparación del rendimiento de cada tratamiento.

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

Para determinar estadísticamente la diferencia de los rendimientos se aplica la prueba de Tukey, los resultados de la tabla 7 – 4 muestran las diferencias de las medias para cada tratamiento con su intervalo respectivo y los valores para cada contraste con respecto al porcentaje de rendimiento obtenido, tomando en consideración los tratamientos con mayor rendimiento se contempla el T2 y T5, los cuales presentan un nivel de significancia menor al p-value y como se observa en la tabla, sus medias promedio son estadísticamente similares, por tal razón se pone en consideración estos dos tratamientos.

**Tabla 7-4:** Resultados de la prueba de Tukey aplicado al rendimiento obtenido al final de los tratamientos.

<i>Tratamientos</i>	<i>Diferencias de las medias</i>	<i>Intervalo 1</i>	<i>Intervalo 2</i>	<i>P valor</i>
<i>T2 – T1</i>	3.6166667	-1.192198	8.4255315	0.1908364
<i>T3 – T1</i>	-11.6700000	-16.478865	-6.8611352	0.0000358
<i>T4 – T1</i>	0.8166667	-3.992198	5.6255315	0.9912473
<i>T5 – T1</i>	3.2400000	-1.568865	8.0488648	0.2794780
<i>T6 – T1</i>	-4.9133333	-9.722198	-0.1044685	0.0442398
<i>T3 – T2</i>	-15.2866667	-20.095531	-10.4778018	0.0000021
<i>T4 – T2</i>	-2.8000000	-7.608865	2.0088648	0.4175583
<i>T5 – T2</i>	-0.3766667	-5.185531	4.4321982	0.9997782
<i>T6 – T2</i>	-8.5300000	-13.338865	-3.7211352	0.0007258
<i>T4 – T3</i>	12.4866667	7.677802	17.2955315	0.0000178
<i>T5 – T3</i>	14.9100000	10.101135	19.7188648	0.0000027
<i>T6 – T3</i>	6.7566667	1.947802	11.5655315	0.0051076
<i>T5 – T4</i>	2.4233333	-2.385531	7.2321982	0.5603277
<i>T6 – T4</i>	-5.7300000	-10.538865	-0.9211352	0.0168895
<i>T6 – T5</i>	-8.1533333	-12.962198	-3.3444685	0.0010825

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

#### 4.1.4.2. Porcentaje de pureza de celulosa obtenida

Los tratamientos presentan una pureza de celulosa superior al 50%, siendo el tratamiento 2 el de mayor con un 74.74 % y el 4 de menor según sus medias, el resumen estadístico se encuentra en la tabla 8 – 4.

**Tabla 8-4:** Resumen estadístico del porcentaje de pureza de celulosa obtenido al final de los tratamientos.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio de porcentaje de pureza de celulosa obtenida	Varianza
Tratamiento 1	3	158.42	52.8066	2.9486
Tratamiento 2	3	224.24	74.7466	0.5864
Tratamiento 3	3	180.68	60.2266	5.1060
Tratamiento 4	3	131.11	43.7033	3.4996
Tratamiento 5	3	207.27	69.0900	1.8372
Tratamiento 6	3	196.28	65.4266	8.7286

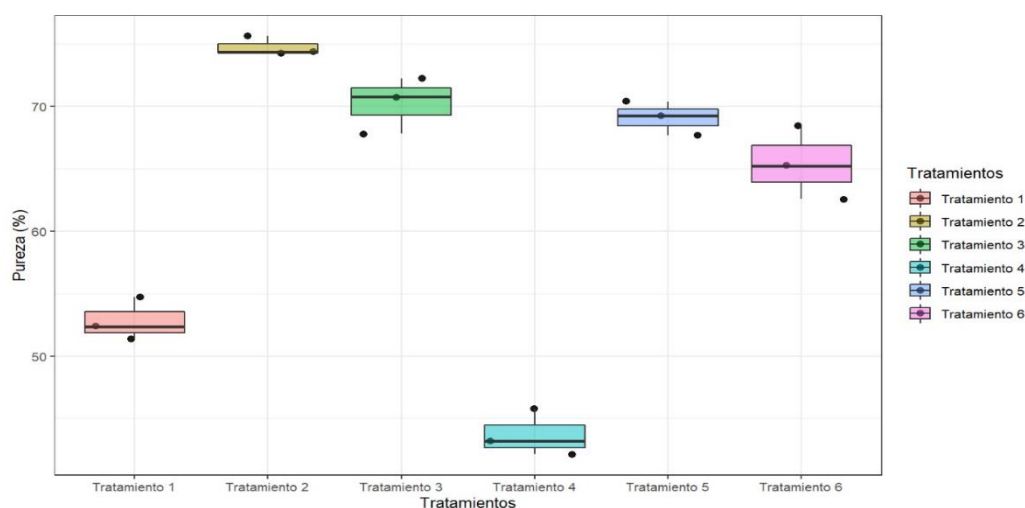
**Elaborado:** Briones, Javier 2021

El análisis de varianza realizado, permitió la interacción de los datos obtenidos en los tratamientos con respecto a la pureza de la celulosa, en la tabla 9 – 4 se detallan los estadísticos el cual reporta diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05^{**}$ ) y que las medias de las repeticiones para cada tratamiento son diferentes. La figura 2 – 4 muestra el reporte de estas diferencias.

**Tabla 9-4:** Análisis de varianza del porcentaje de pureza de celulosa obtenido al final de los tratamientos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Probabilidad F	Valor crítico para F
				8.7117	0.00109
Entre grupos	1922.753267	5	384.5506533	197	5492
Dentro de los grupos	529.7011333	12	44.14176111		3.10587524
Total	2452.4544	17			

**Elaborado:** Briones, Javier 2021



**Gráfico 2-4:** Comparación del % de pureza de cada tratamiento.

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

El método de comparaciones múltiples (Tukey) aplicado para los resultados del % de pureza de celulosa de cada tratamiento se observa en la tabla 10 – 4, permite crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de cada intervalo, donde se observa un valor significativo del tratamiento T2 con el resto, siendo este en el que se obtiene mayor pureza de celulosa.

**Tabla 10-4:** Resultados de la prueba de Tukey aplicado al del porcentaje de pureza de celulosa obtenido al final de los tratamientos.

<i>Tratamientos</i>	<i>Diferencias de las medias</i>	<i>Intervalo 1</i>	<i>Intervalo 2</i>	<i>P valor</i>
<i>T2 – T1</i>	21.940000	16.604756	27.2752436	0.0000001
<i>T3 – T1</i>	17.446667	12.111423	22.7819103	0.0000015
<i>T4 – T1</i>	-9.103333	-14.438577	-3.7680897	0.0010240
<i>T5 – T1</i>	16.283333	10.948090	21.6185769	0.0000032
<i>T6 – T1</i>	12.620000	7.284756	17.9552436	0.0000463
<i>T3 – T2</i>	-4.493333	-9.828577	0.8419103	0.1193178
<i>T4 – T2</i>	-31.043333	-36.378577	-25.7080897	0.0000000
<i>T5 – T2</i>	-5.656667	-10.991910	-0.3214231	0.0355803
<i>T6 – T2</i>	-9.320000	-14.655244	-3.9847564	0.0008320
<i>T4 – T3</i>	-26.550000	-31.885244	-21.2147564	0.0000000
<i>T5 – T3</i>	-1.163333	-6.498577	4.1719103	0.9737846
<i>T6 – T3</i>	-4.826667	-10.161910	0.5085769	0.0850050
<i>T5 – T4</i>	25.386667	20.051423	30.7219103	0.0000000
<i>T6 – T4</i>	21.723333	16.388090	27.0585769	0.0000001
<i>T6 – T5</i>	-3.663333	-8.998577	1.6719103	0.2630432

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

#### 4.1.5. Propiedades de la celulosa microcristalina obtenida

Luego de la valoración experimental de los tratamientos según su rendimiento y porcentaje de pureza se considera el tratamiento 2 como el más eficiente.

Las propiedades del producto se determinaron de acuerdo a las normas INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y en combinación con las normas ANSI (American Society for Testing and Materials) y TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industries), en la tabla se observa los resultados de las principales propiedades físico-químicas analizadas.

**Tabla 11-4:** Resultados físico-químicos del producto obtenido.

<i>Ceniza %</i>	<i>Pureza celulosa %</i>	<i>Humedad %</i>	<i>pH</i>	<i>Identificación cualitativa de celulosa</i>
<i>1.8</i>	<i>74.74</i>	<i>4.3</i>	<i>6.8</i>	<i>Positivo</i>

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

##### 4.1.5.1. Solubilidad

La prueba de solubilidad de la celulosa micro cristalina obtenida, se realizó bajo la normativa INEN la cual indica que debe ser insoluble, en ácidos, etanol y otras sustancias. En la tabla se observa que los resultados son satisfactorios al no presentar solubilidad en los reactivos.

**Tabla 12-4:** Resultados de solubilidad.

<i>Solvente</i>	<i>Solubilidad</i>
<i>Ácido Acético 20%</i>	<i>No</i>
<i>Hipoclorito de sodio 5%</i>	<i>No</i>
<i>Ácido sulfúrico 15%</i>	<i>No</i>
<i>Ácido clorhídrico 10%</i>	<i>No</i>
<i>Etanol 98%</i>	<i>No</i>
<i>Agua</i>	<i>No</i>

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

##### 4.1.5.2. Tamaño de partícula

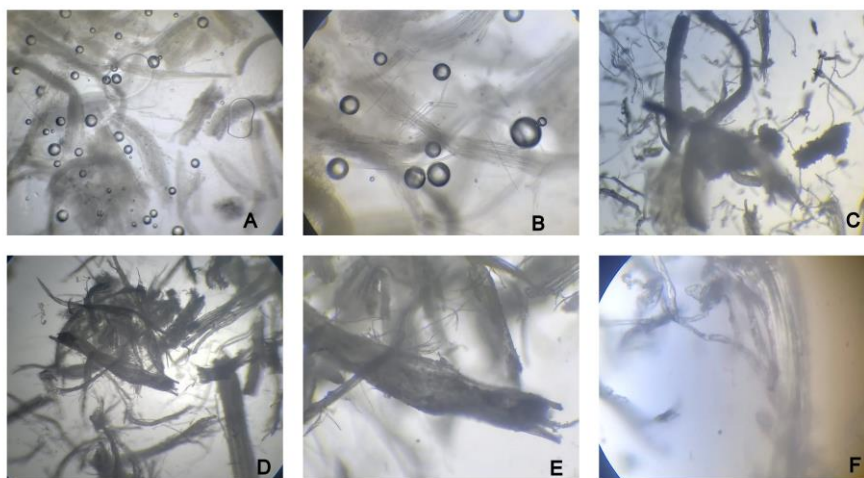
En la tabla 13 – 4 se presentan los resultados de la prueba de tamizaje para 10 gramos de muestra, el tamaño de las partículas de celulosa microcristalina obtenida con el tratamiento T2 es de aproximadamente 0.1050 mm al pasar más del 50% por una malla de 140.

**Tabla 13-4:** Resultados de solubilidad.

<i>Tamaño de malla</i>	<i>Porcentaje de peso retenido (%)</i>	<i>Porcentaje de peso Acumulado (%)</i>	<i>Tamaño de partícula mm</i>
<i>80.00</i>	<i>6.124</i>	<i>6.124</i>	<i>0.177</i>
<i>100.00</i>	<i>3.275</i>	<i>9.399</i>	<i>0.149</i>
<i>120.00</i>	<i>14.184</i>	<i>23.583</i>	<i>0.125</i>
<i>140.00</i>	<i>56.375</i>	<i>79.958</i>	<i>0.105</i>
<i>Fondo</i>	<i>20.042</i>	<i>100</i>	

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

Según (García-garcía *et al.* 2013; Pineda 2018) el tamaño de la celulosa microcristalina para el comercio debe de tener las siguientes especificaciones: +60 malla < 1.0 % y en malla + 200 < 30 %, estando dentro del rango el producto obtenido en la investigación.



*A = 4x, B=10x, C y D =40x, E= 80x, F= 100x*

**Gráfico 3-4:** Vista de la celulosa microcristalina desde el microscopio.

#### **4.1.6. Comparación de propiedades de celulosa microcristalina**

La comparación se llevó a cabo bajo las especificaciones establecidas por el Reglamento (CE) n°1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre aditivos alimentarios, con respecto a la celulosa microcristalina. La celulosa microcristalina obtenida a partir del *Pennisetum Purpureum* cumple con parámetros de pH, humedad y solubilidad, lo contrario para los parámetros de pureza y % de cenizas para poder ser grado alimenticio o farmacéutico según las características estipuladas por (Comisión del Parlamento Europeo 2012).

**Tabla 14-4:** Comparación de las propiedades de la celulosa microcristalina obtenida con las especificaciones establecidas por el Reglamento (CE) n°1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, con respecto a la celulosa microcristalina.

<i>Características</i>	<i>Celulosa microcristalina obtenida a partir del Pennisetum Purpureum</i>	<i>Celulosa microcristalina comercial</i>
<i>Descripción Física</i>	<i>Polvo fino y casi blanco, inodoro</i>	<i>Polvo fino y blanco o casi blanco, inodoro</i>
<i>% Pureza</i>	74.74	Mayor del 97%
<i>% Humedad</i>	4.3	Menor del 7%
<i>% Cenizas</i>	1.8	Menor del 0.5%
<i>pH</i>	6.8	5.0 a 7.5
<i>Solubilidad</i>	<i>Ácidos</i>	<i>Insoluble</i>
	<i>Etanol</i>	<i>Insoluble</i>
	<i>Agua</i>	<i>Insoluble</i>

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

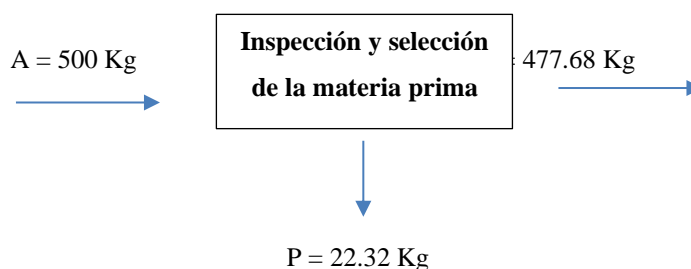
Dado producto se deja abierto a la posibilidad de estudio en campos industriales diferentes a los ya mencionados.

## 4.2. Diseño de ingeniería para la obtención de celulosa microcristalina

### 4.2.1. Balance de masa

El objetivo de los balances de masa en las operaciones del proceso de obtención de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum (Pasto Elefante), es obtener el rendimiento de cada una de las etapas según el diseño a escala industrial, tomando como base de cálculo la masa de los componentes que ingresa y sale en cada etapa. El cálculo del producto se realiza para 500 kg/día de Pennisetum Purpureum (Pasto Elefante), teniendo en consideración el diagrama de proceso y balance de masa de las variables y operaciones realizadas a nivel de laboratorio grafico 1 – 3.

#### 4.2.1.1. Inspección y selección de la materia prima



Dónde:

A = Alimentación de Pasto Elefante (Kg)

B = Masa de materia prima en buen estado (Kg)

P = Impurezas (Kg)

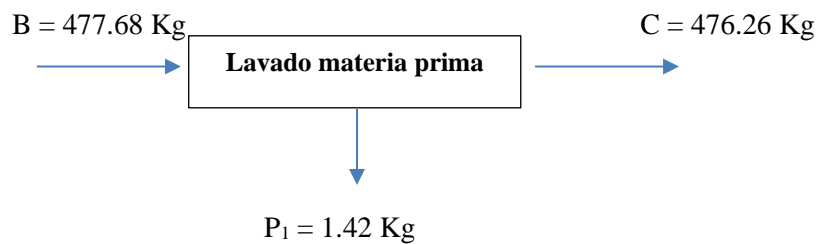
$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{B}{A} * 100$$
$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{477.68 \text{ Kg}}{500 \text{ Kg}} * 100$$
$$\text{Rendimiento (\%)} = 95.53 \%$$

**Tabla 15-4:** Balance de masa de la etapa de inspección y selección.

Inspección y selección materia prima					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima	500.00	100.00	Materia prima en buen estado	477.68	95.53
			Impureza	22.32	4.47
<b>Total</b>	<b>500.00</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>500.00</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.2. Lavado materia prima



Dónde:

C = Masa de materia prima lavada (Kg)

P<sub>1</sub> = Perdida (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{C}{B} * 100$$
$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{476.26 \text{ Kg}}{477.68 \text{ Kg}} * 100$$
$$\text{Rendimiento (\%)} = 99.70 \%$$

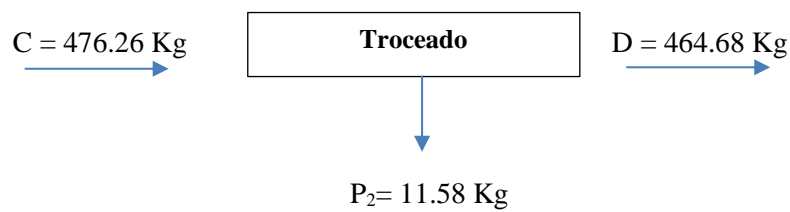


**Tabla 16-4:** Balance de masa de la etapa de inspección y selección.

Lavado materia prima					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima en buen estado	477.68	100.00	Materia prima lavada	476.26	99.70
			Perdida	1.42	0.30
<b>Total</b>	<b>477.68</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>477.68</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.3. Troceado materia prima



Dónde:

D = Masa de materia prima troceada (Kg)

P<sub>2</sub> = Perdida (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{D}{C} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{464.68 \text{ Kg}}{476.26 \text{ Kg}} * 100$$

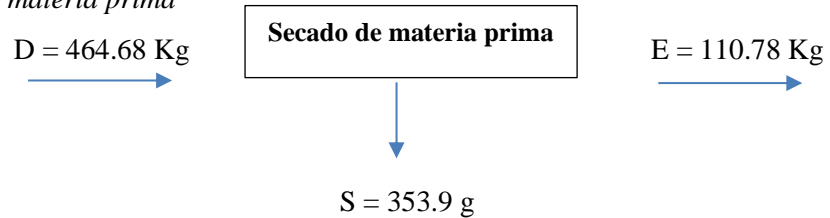
$$\text{Rendimiento (\%)} = 97.57 \%$$

**Tabla 17-4:** Balance de masa de la etapa de troceado de la materia prima.

Troceado materia prima					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima lavada	476.26	100.00	Materia prima troceada	464.68	97.57
			Perdida	5.79	2.43
<b>Total</b>	<b>476.26</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>476.26</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.4. *Secado de materia prima*



Dónde:

E = Masa de materia prima seca (Kg)

S = Agua evaporada (Kg)

$$D = E + S$$

$$S = 464.68 \text{ Kg} - 110.78 \text{ Kg}$$

$$S = 353.9 \text{ Kg}$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{E}{D} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{110.78 \text{ Kg}}{464.68 \text{ Kg}} * 100$$

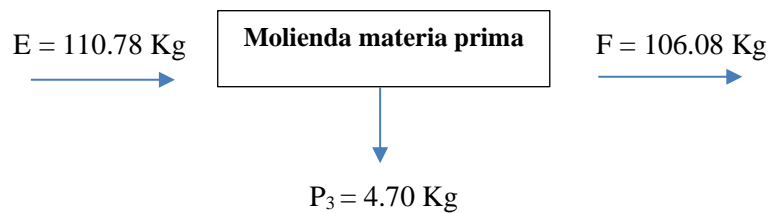
$$\text{Rendimiento (\%)} = 23.84 \%$$

**Tabla 18-4:** Balance de masa de la etapa de secado de materia prima.

Secado de materia prima					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima troceada	464.68	100.00	Materia prima troceada seca	110.78	23.84
			Agua evaporada	353.90	76.16
<b>Total</b>	<b>464.68</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>464.68</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.5. *Molienda materia prima*



Dónde:

F = Masa de materia prima seca molida (g)

P<sub>3</sub> = perdida (g)

$$Rendimiento (\%) = \frac{F}{E} * 100$$

$$Rendimiento (\%) = \frac{106.08 \text{ Kg}}{110.78 \text{ Kg}} * 100$$

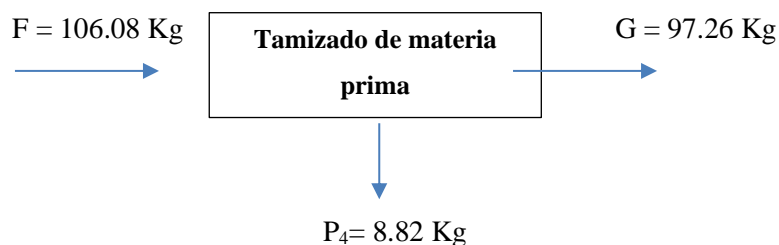
$$Rendimiento (\%) = 95.76 \%$$

**Tabla 19-4:** Balance de masa de la etapa de molienda de la materia prima.

Molienda de materia prima					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima troceada seca	110.78	100.00	Materia prima molida seca	106.08	95.76
			Perdida	4.70	4.24
<b>Total</b>	<b>110.78</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>110.78</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.6. Tamizado de materia prima



Dónde:

G = Masa del Pasto Elefante seco tamizado (Kg)

P<sub>4</sub> = perdida (Kg)

$$Rendimiento (\%) = \frac{G}{F} * 100$$

$$Rendimiento (\%) = \frac{97.26 \text{ Kg}}{106.08 \text{ Kg}} * 100$$

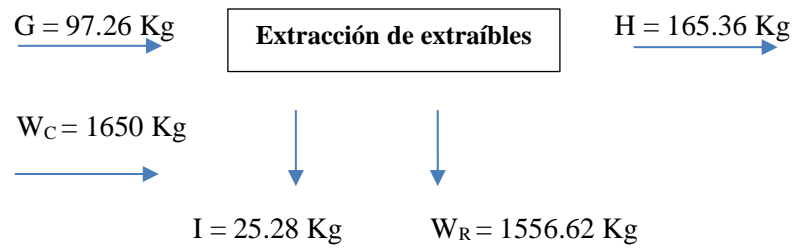
$$Rendimiento (\%) = 91.69 \%$$

**Tabla 20-4:** Balance de masa de la etapa de tamizado de la materia prima.

Tamizado de la materia prima					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima molida seca	106.08	100.00	Materia prima tamizada seca	97.26	91.69
			Perdida	8.82	8.31
<b>Total</b>	<b>106.08</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>106.08</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.7. Extracción de extraíbles



Dónde:

H = Masa de materia prima luego de la extracción de extraíbles (Kg)

I = Extraíbles (Kg)

W<sub>C</sub> = Agua caliente (Kg)

W<sub>R</sub> = Agua residual (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{H}{G + W_C} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{165.36 \text{ Kg}}{1747.26 \text{ Kg}} * 100$$

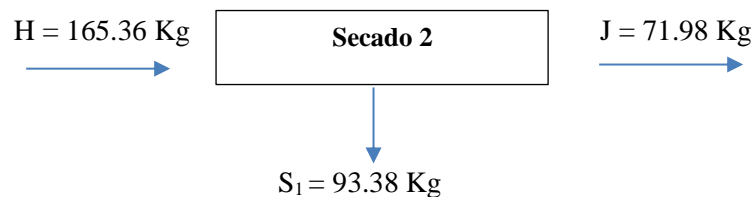
$$\text{Rendimiento (\%)} = 9.46 \%$$

**Tabla 21-4:** Balance de masa de la etapa de extracción de extraíbles.

Extracción de extraíbles					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima tamizada seca	97.26	5.57	Materia prima luego de la extracción de extraíbles	165.36	9.46
Agua caliente	1650	94.43	Extraíbles	25.28	1.46
			Agua residual	1556.62	89.08
<b>Total</b>	<b>1747.26</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>1747.26</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.8. Secado 2



Dónde:

J = Masa de materia prima seca luego de extracción de extraíbles (Kg)

S<sub>1</sub> = Agua evaporada (Kg)

$$H = J + S$$

$$S = 165.36 \text{ Kg} - 71.98 \text{ Kg}$$

$$S = 93.38 \text{ Kg}$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{J}{H} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{71.98 \text{ Kg}}{165.36 \text{ Kg}} * 100$$

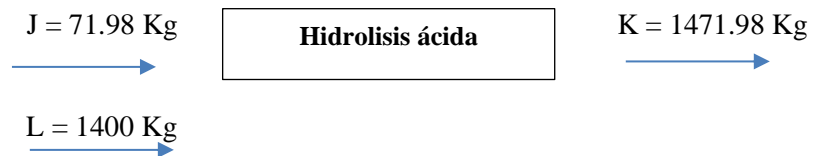
$$\text{Rendimiento (\%)} = 43.52 \%$$

**Tabla 22-4:** Balance de masa de la etapa de secado luego de extraíbles.

Secado de la materia prima luego de extraíbles					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Materia prima luego de extraíbles	165.36	100.00	Materia prima seca luego de extraíbles	71.98	43.52
			Agua evaporada	93.38	56.48
<b>Total</b>	165.36	100.00	<b>Total</b>	165.36	100.00

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.9. Hidrolisis ácida



Dónde:

K = Mezcla de materia prima con ácido sulfúrico al 0.4% (Kg)

L = Ácido sulfúrico al 0.4 % (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{K}{J + L} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{1471.98 \text{ Kg}}{1471.98 \text{ Kg}} * 100$$

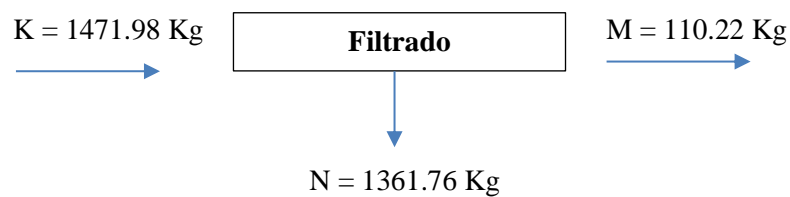
$$\text{Rendimiento (\%)} = 100 \%$$

**Tabla 23-4:** Balance de masa de la etapa de hidrolisis ácida.

<b>Hidrolisis ácida</b>					
<b>Entrada</b>			<b>Salida</b>		
<b>Composición</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>	<b>Composición</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>
<b>Materia prima seca luego de extraíbles</b>	71.98	4.89	<b>Mezcla de materia prima con H2SO4 al 0.4%</b>	1471.98	100.00
<b>H2SO4 0.4%</b>	1400.00	95.11	<b>H2SO4 al 0.4%</b>		
<b>Total</b>	1471.98	100.00	<b>Total</b>	1471.98	100.00

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.10. Filtrado



Dónde:

M = Masa de pulpa filtrada luego de hidrolisis ácida (Kg)

N = Licor (kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{M}{K} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{110.22 \text{ Kg}}{1471.98 \text{ Kg}} * 100$$

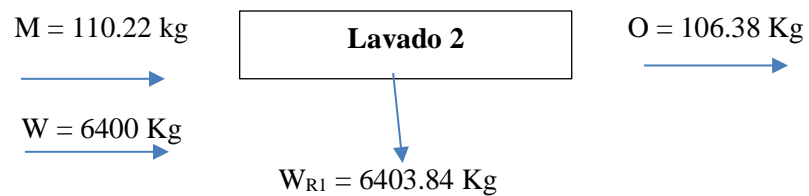
$$\text{Rendimiento (\%)} = 7.48 \%$$

**Tabla 24-4:** Balance de masa de la etapa de filtrado de hidrolisis ácida.

<b>Filtrado luego de hidrolisis ácida</b>					
<b>Entrada</b>			<b>Salida</b>		
<b>Composición</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>	<b>Composición</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>
<b>Mezcla de pulpa con H2SO4 al 0.4%</b>	1471.98	100.00	<b>Pulpa Filtrada luego de hidrolisis ácida</b>	110.22	7.48
			<b>Licor</b>	1361.76	92.52
<b>Total</b>	1471.98	100.00	<b>Total</b>	1471.98	100.00

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.11. Lavado 2



Dónde:

O = Masa de pulpa lavada luego de hidrolisis ácida (Kg)

$W_{R1}$  = Agua residual (Kg)

W = Agua (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{O}{M + W} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{106.38 \text{ Kg}}{6510.22 \text{ Kg}} * 100$$

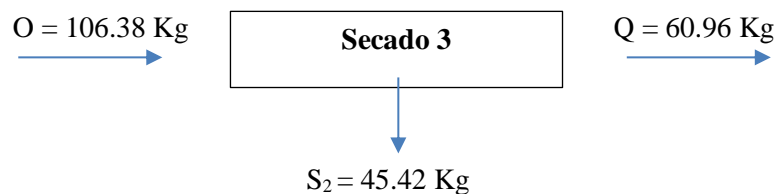
$$\text{Rendimiento (\%)} = 1.63 \%$$

**Tabla 25-4:** Balance de masa de la etapa de lavado de pulpa luego de hidrolisis ácida.

Lavado de pulpa luego de hidrolisis ácida					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pulpa Filtrada luego de hidrolisis ácida	110.22	1.69	Pulpa lavada luego de hidrolisis ácida	106.38	1.63
Agua	6400	98.31	Agua residual 2	6403.84	92.52
<b>Total</b>	<b>6510.22</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>6510.22</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.12. Secado 3



Dónde:

Q = Masa de la pulpa seca luego de hidrolisis ácida (Kg)

$S_2$  = Agua evaporada (Kg)

$$O = Q + S$$

$$S = 106.38 \text{ Kg} - 60.96 \text{ Kg}$$

$$S = 45.42 \text{ Kg}$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{Q}{O} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{60.96 \text{ Kg}}{106.38 \text{ Kg}} * 100$$

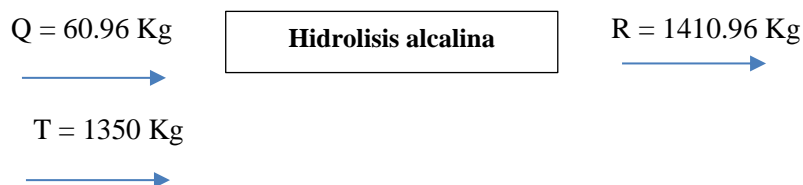
$$\text{Rendimiento (\%)} = 57.31 \%$$

**Tabla 26-4:** Balance de masa de la etapa de secado de pulpa luego de hidrolisis ácida.

Secado de pulpa luego de hidrolisis acida					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pulpa lavada luego de hidrolisis acida	106.38	100.00	Pulpa seca luego de hidrolisis acida	60.96	57.31
			Agua evaporada	45.42	42.69
<b>Total</b>	<b>106.38</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>106.38</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.13. Hidrolisis alcalina



Dónde:

R = Mezcla de pulpa con hidróxido de sodio al 20% (Kg)

T = Hidróxido de sodio al 20% (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{R}{Q + T} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{1410.96 \text{ Kg}}{1410.96 \text{ Kg}} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 100 \%$$

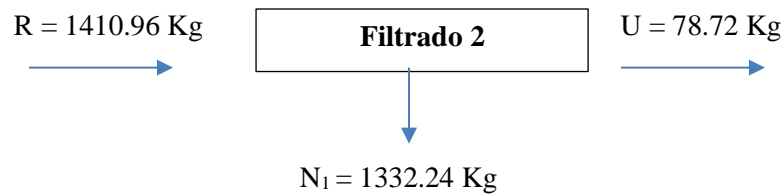
**Tabla 27-4:** Balance de masa de la etapa de hidrolisis alcalina.

Hidrolisis alcalina					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pulpa seca luego de hidrolisis acida	60.96	4.33	Mezcla pulpa con NaOH al 20%	1410.96	100.00
NaOH 20%	1350.00	95.67			
<b>Total</b>	<b>1410.96</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>1410.96</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021



4.2.1.14. Filtrado 2



Dónde:

U = Masa de pasta filtrada luego de hidrolisis alcalina (Kg)

N<sub>1</sub> = Licor (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{U}{R} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{78.72 \text{ Kg}}{1410.96 \text{ Kg}} * 100$$

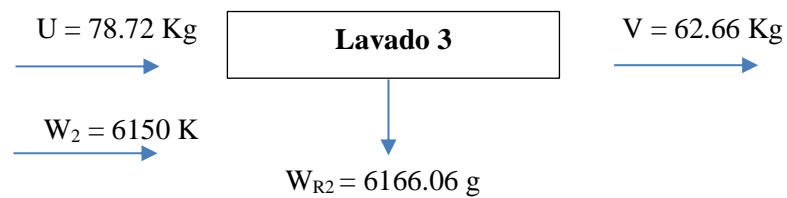
$$\text{Rendimiento (\%)} = 5.57 \%$$

**Tabla 28-4:** Balance de masa de la etapa de filtrado luego de hidrolisis alcalina.

Filtrado de pasta luego de hidrolisis alcalina					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Mezcla de pasta con NaOH al 20%	1410.96	100.00	Pasta Filtrada luego de hidrolisis alcalina	78.72	5.57
			Licor 2	1332.24	94.43
<b>Total</b>	<b>1410.96</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>1410.96</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.15. Lavado 3



Dónde:

V = Masa de pulpa lavada luego de hidrolisis alcalina (kg)

W<sub>R2</sub> = Agua residual del lavado de hidrolisis alcalina (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{V}{U + W_2} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{62.66 \text{ Kg}}{6228.72 \text{ Kg}} * 100$$

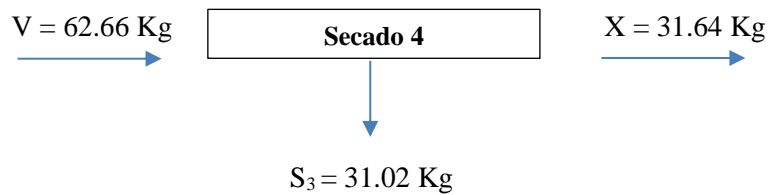
$$\text{Rendimiento (\%)} = 1.006 \%$$

**Tabla 29-4:** Balance de masa de la etapa de lavado luego de hidrolisis alcalina.

Lavado de pasta luego de hidrolisis alcalina					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pasta filtrada luego de hidrolisis alcalina	78.72	1.27	Pasta lavada luego de hidrolisis alcalina	62.66	1.006
Agua	6150	98.73	Agua residual 3	6166.06	98.994
<b>Total</b>	<b>6228.72</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>6228.72</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.16. Secado 4



Dónde:

X = Masa de la pasta seca luego de hidrolisis alcalina (Kg)

S<sub>3</sub> = Agua evaporada (Kg)

$$V = X + S$$

$$S = 62.66 \text{ Kg} - 31.64 \text{ Kg}$$

$$S = 31.02 \text{ Kg}$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{X}{V} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{31.64 \text{ Kg}}{62.66 \text{ Kg}} * 100$$

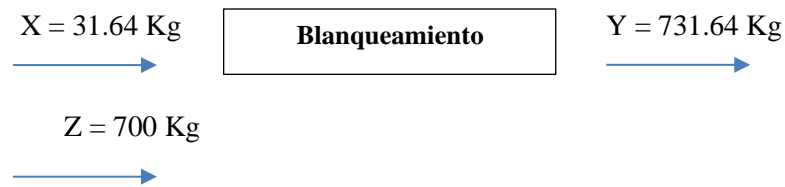
$$\text{Rendimiento (\%)} = 50.49 \%$$

**Tabla 30-4:** Balance de masa de la etapa de secado luego de hidrolisis alcalina.

Secado de pasta luego de hidrolisis alcalina					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pulpa lavada luego de hidrolisis alcalina	62.66	100.00	Pulpa seca luego de hidrolisis alcalina	31.64	50.49
			Agua evaporada 4	31.02	49.51
<b>Total</b>	<b>62.66</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>62.66</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.17. Blanqueamiento



Dónde:

Y = Mezcla de pulpa con hipoclorito de sodio al 5% (Kg)

Z = Hipoclorito de sodio al 5% (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{Y}{X + Z} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{731.64 \text{ Kg}}{731.64 \text{ Kg}} * 100$$

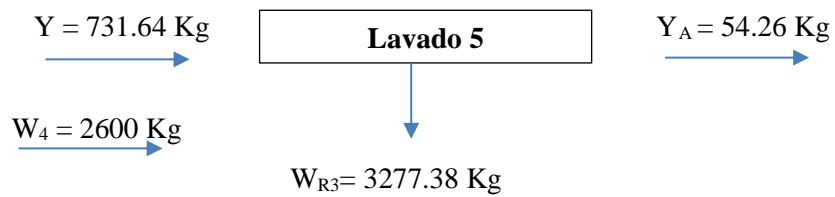
$$\text{Rendimiento (\%)} = 100 \%$$

**Tabla 31-4:** Balance de masa de la etapa de blanqueamiento de pulpa.

Blanqueamiento de Pulpa					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pulpa seca luego de hidrolisis alcalina	31.64	4.33	Mezcla de pulpa con NaOH al 20%	731.64	100.00
NaOH 20%	700.00	95.67			
<b>Total</b>	<b>731.64</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>731.64</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.18. Lavado 5



Dónde:

YA = Pulpa de celulosa blanqueada lavada (Kg)

WR5 = Agua residual del proceso de lavado (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{Y_A}{Y + W_4} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{54.26 \text{ Kg}}{3331.64 \text{ Kg}} * 100$$

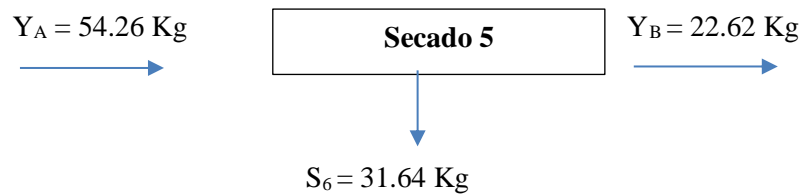
$$\text{Rendimiento (\%)} = 1.62 \%$$

**Tabla 32-4:** Balance de masa de la etapa de blanqueamiento de pulpa.

Lavado de la pulpa de celulosa después del blanqueo					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pulpa de celulosa después del blanqueo	731.64	21.97	Pulpa de celulosa balqueada lavada	54.26	1.62
Agua	2600.00	78.03	Agua residual	3277.38	98.38
<b>Total</b>	<b>3331.64</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>3331.64</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

4.2.1.19. Secado 5



Dónde:

$Y_B$  = Celulosa microcristalina seca (Kg)

$S_6$  = Agua evaporada (Kg)

$$Y_A = Y_B + S_6$$

$$S_6 = 54.26 \text{ Kg} - 22.62 \text{ Kg}$$

$$S_6 = 31.64 \text{ Kg}$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{Y_B}{Y_A} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{22.62 \text{ Kg}}{54.26 \text{ Kg}} * 100$$

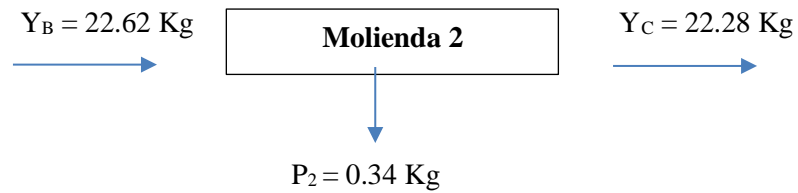
$$\text{Rendimiento (\%)} = 41.69 \%$$

**Tabla 33-4:** Balance de masa de la etapa secado de celulosa microcristalina.

Secado de celulosa microcristalina					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Pulpa de celulosa balqueada lavada	54.26	100.00	Celulosa microcristalina seca	22.62	41.69
			Agua evaporada	31.64	58.31
<b>Total</b>	<b>54.26</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>54.26</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.20. Molienda 2



Dónde:

$Y_C$  = Polvo de celulosa microcristalina (Kg)

$P_2$  = pérdida (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{Y_C}{Y_B} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{22.28 \text{ Kg}}{22.62 \text{ Kg}} * 100$$

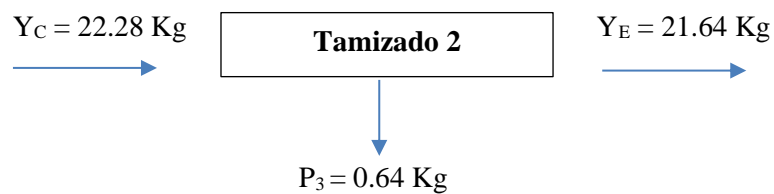
$$\text{Rendimiento (\%)} = 98.49 \%$$

**Tabla 34-4:** Balance de masa de la etapa de molienda de celulosa microcristalina.

Molienda de celulosa microcristalina					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Celulosa microcristalina seca	22.62	100.00	Celulosa microcristalina molida seca	22.28	98.49
			Perdida	0.32	1.51
<b>Total</b>	<b>22.62</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>22.62</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

#### 4.2.1.21. Tamizado 2



Dónde:

$Y_E$  = Polvo de celulosa microcristalina tamizada (Kg)

$P_3$  = pérdida (Kg)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{Y_E}{Y_C} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{21.64 \text{ Kg}}{22.28 \text{ Kg}} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 97.12 \%$$

**Tabla 35-4:** Balance de masa de la etapa de tamizado de celulosa microcristalina.

Tamizado de celulosa microcristalina molida					
Entrada			Salida		
Composición	Kg	%	Composición	Kg	%
Celulosa microcristalina molida seca	22.28	100.00	Celulosa microcristalina tamizada	21.64	97.12
			Perdida	0.64	2.88
<b>Total</b>	<b>22.28</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>22.28</b>	<b>100.00</b>

Realizado por: Briones, Javier, 2021

### 4.3. Diseño de Equipos

#### 4.3.1. Diseño de la mesa de selección y lavado de materia prima

##### 4.3.1.1. Volumen de la mesa

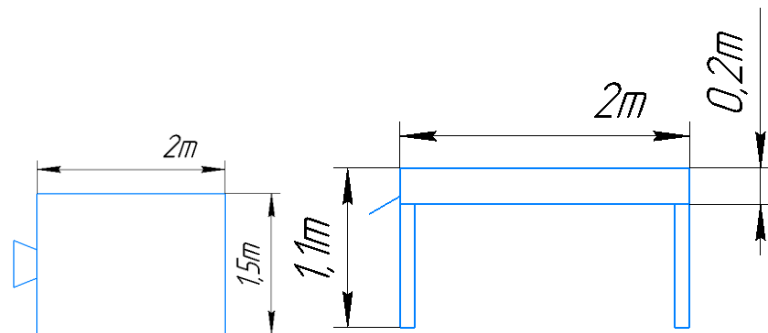
**Tabla 36-4:** Dimensiones de la mesa de selección y Lavado de materia prima.

Especificaciones	Dimensión (m)
Longitud (L)	2
Ancho (a)	1.5
Altura de la caja (hc)	0.2
Altura de la mesa (hm)	1.1

Realizado por: Briones, Javier, 2021

$$V_m = L * a * h_c$$

$$V_m = 2m * 1.5m * 0.2m = 0.6m^3$$



**Gráfico 4-4:** Dimensiones de la mesa.

Elaborado: Briones, Javier 2021

#### 4.3.1.2. Capacidad de la mesa

Densidad del Pasto Elefante = 900 Kg/m<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{Pasto Elefante}} = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho_{\text{Pasto Elefante}} * V$$

$$m = 900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.6 \text{m}^3 = 540 \text{Kg}$$

#### 4.3.2. Diseño Picadora industrial

##### 4.3.2.1. Volumen de la picadora

$$V_t = \frac{m}{\rho_{\text{Pasto Elefante}}}$$

Dónde:

V<sub>t</sub> = Volumen total (m<sup>3</sup>)

m = masa del Pasto Elefante (kg)

ρ = Densidad del Pasto Elefante (kg/m<sup>3</sup>)

$$V_t = \frac{500 \text{Kg}}{900 \text{Kg}/\text{m}^3} = 0.56 \text{m}^3$$

Debido a que el volumen es alto se lo divide en 2 lotes siendo el volumen de diseño el siguiente:

$$V_t = \frac{0.56 \text{m}^3}{2} = 0.28 \text{m}^3$$

##### 4.3.2.2. Radio de tanque

Se considera un diámetro para la picadora de 0.8m.

$$r = \frac{\phi}{2}$$

$$r = \frac{0.8 \text{m}}{2} = 0.4 \text{m}$$

##### 4.3.2.3. Altura del tanque

$$H = \frac{4 * V_t}{\pi * \phi^2}$$

$$H = \frac{4 * 0.28 \text{m}^3}{3.1416 * (0.8\text{m})^2} = 0.55 \text{m}$$

Se adiciona un factor de seguridad a la altura del tanque para una adecuada operación del 30%.

$$H_t = 0.55\text{m} * 1.30 = 0.72 \text{m}$$

#### 4.3.2.4. Velocidad Angular

La velocidad angular para una picadora industrial corresponde a 1760,7 rpm según (CUADRADO ÁLVAREZ 2019)

$$W = \frac{1760.7 \text{ rev}}{1 \text{ min}} * \frac{2\pi \text{ Rad}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 184,38 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

#### 4.3.2.5. Longitud de las cuchillas

Según (CUADRADO ÁLVAREZ 2019) la longitud de la cuchilla es eficaz de 5/7 del radio circular.

$$d_c = \frac{5*r}{7}$$
$$d_c = \frac{5 * 0.4m}{7} = 0.29 \text{ m}$$

#### 4.3.2.6. Radio del rodete de cuchillas

$$r_{rc} = \frac{2*d_c}{5}$$
$$r_{rc} = \frac{2 * 0.29m}{5} = 0.12 \text{ m}$$

#### 4.3.2.7. Energía de ruptura

$$E_{ruptura} = m_{pasto} * g * H$$

Dónde:

$E_{ruptura}$ : Energía de ruptura

$M_{pasto}$ : Masa de pasto a procesar

H: Altura tanque contenedor

g: Gravedad

$$E_{ruptura} = 252 \text{ kg} * 9.8 \frac{m}{s^2} * 0.72 \text{ m} = 1778.12 \text{ J}$$

#### 4.3.2.8. Velocidad de cuchilla

$$v = \sqrt{\frac{2 * E_{ruptura}}{m_{pasto}}} \quad (\text{Ec. 10 - 4})$$
$$v = \sqrt{\frac{2 * 1778.12 \text{ J}}{252 \text{ Kg}}} = 3,75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



#### 4.3.2.9. Aceleración angular

$$\alpha = \frac{1}{2} * \frac{W^2}{2\pi rad}$$
$$\alpha = \frac{1}{2} * \frac{(184.38 \text{ rad/s})^2}{2\pi rad} = 2705,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

#### 4.3.2.10. Masa de cuchilla móvil

$$m_c = \frac{F_c * 3}{\alpha * d_c}$$

Fc = Fuerza de corte (50.54 N)

$$m_c = \frac{50.54 \text{ N} * 3}{2705.3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} * 0.29 \text{ m}} = 0.19 \text{ Kg}$$

#### 4.3.2.11. Fuerza centrífuga de la cuchilla

$$F_c = m_c * W^2 * r$$
$$F_c = 0.19 \text{ Kg} * \left(184.28 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 * 0.4 \text{ m} = 28.01 \text{ N}$$

#### 4.3.2.12. Fuerza cortante

$$\tau = \frac{F_c}{A}$$
$$A = e * d_c$$

Dónde:

A = área cuchilla

e = espesor cuchilla (0.008m)

$$A = 0.008 \text{ m} * 0.29 \text{ m} = 0.0023 \text{ m}^2$$

$$\tau = \frac{28.01 \text{ N}}{0.0023 \text{ m}^2} = 12178 \text{ Pa}$$

#### 4.3.2.13. Torque de cuchilla

$$T = d_c * F_c$$
$$T = 0.29 \text{ m} * 28.01 \text{ N} = 8.12 \text{ Nm}$$

#### 4.3.2.14. Potencia del motor

$$P = \frac{T * W}{9550}$$
$$P = \frac{8.12 \text{ Nm} * 1760.7 \text{ rpm}}{9550} = 1.50 \text{ KW} * \frac{1 \text{ hp}}{1.34 \text{ kw}} = 1.11 \cong 1.5 \text{ hp}$$

### 4.3.3. Estufa de secado para la materia prima

#### 4.3.3.1. Volumen de materia prima que entra a la estufa

$$V_t = \frac{464.68 \text{ Kg}}{900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.52 \text{ m}^3$$

#### 4.3.3.2. Volumen del secador

$$V_s = L * a * h_s$$

Largo = 1,2 m

Ancho = 0,8 m

Alto = 1,1 m

$$V_s = 1.5 \text{ m} * 0.8 \text{ m} * 1.5 \text{ m} = 1.05 \text{ m}^3$$

Aplicamos un factor de seguridad de 15%:

$$V_t = 1.05 \text{ m}^3 * 1.15 = 1.20 \text{ m}^3$$

#### 4.3.3.3. Cálculo de calor necesario para secar la materia prima

$$Q_a = D * C_{p(\text{pasto elefante})} * \Delta T$$

Dónde:

D = Cantidad de pasto elefante que sale del secador (kg)

Cp (pasto elefante) = Calor específico del pasto elefante (KJ/kg °C)

ΔT = Variación de temperatura (° C)

Qa = Calor necesario para el secado (° C)

$$Q_a = 110.78 \text{ Kg} * 1.348 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} * (100^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 11647.85 \text{ KJ}$$

#### 4.3.3.4. Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar el agua

$$Q_b = W_b * C_{p(\text{agua})} * (212 - T_W) + W_b * h_{fg}$$

Dónde:

Wb = Cantidad de agua evaporada (kg)

Cp = Calor específico del agua (KJ/kg °C)

hfg = Entalpía de evaporación 2449,4 KJ/kg

$$Q_b = 353.9 \text{ Kg} * 4,193 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (212 - 100)^\circ\text{C} + 353.9 \text{ Kg} * 2449.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$= 1033039.76 \text{ KJ}$$

#### 4.3.3.5. Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor

$$Q_c = W_b * (h_{ft} - h_{gt})$$

Dónde:

hgt = Entalpia de vapor saturado a 50°C, tenemos 2592.1 KJ/kg

hft = Entalpia de vapor saturado a 100°C, tenemos 2675.57 KJ/kg

$$Q_c = 353.9 \text{ Kg} * (2675.57 - 2592.1) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 29540.03 \text{ KJ}$$

#### 4.3.3.6. Cálculo del calor total de secado

$$Q_T = Q_a + Q_b + Q_c$$

$$Q_T = (11647.85 + 1033039.76 + 29540.03) \text{ KJ} = 1074227.64 \text{ KJ}$$

#### 4.3.3.7. Cálculo del consumo del vapor

$$C_v = \frac{Q_T}{h_{fg}}$$

$$C_v = \frac{1074227.64 \text{ KJ}}{2449,4 \text{ KJ/kg}} = 438.56 \text{ Kg}$$

### 4.3.4. Molino de martillos

#### 4.3.4.1. Determinación de la Potencia

Según la ley de Bond el índice de trabajo se multiplica por el factor de conversión porque es un material seco.

$$W_i = \frac{4}{3} * 6.695 = 8.97 \text{ KW} \frac{\text{h}}{\text{ton}}$$

$$\frac{P}{m} = 0.815 * W_i * \left( \frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right)$$

Dónde:

P = Potencia del molino (kW)

Wi = Índice de trabajo (kW h/ton)

Dpa = Diámetro del tamiz por donde pase el 80% de la alimentación (mm)

Dpb = Diámetro del tamiz por donde retenga el 80% del producto (mm)

m = masa de alimentación (ton/h)

$$\frac{P}{1.321 \text{ ton/h}} = 0.815 * 8.97 \text{ KW} \frac{\text{h}}{\text{ton}} * \left( \frac{1}{\sqrt{0.36}} - \frac{1}{\sqrt{0.8}} \right) = 5.25 \text{ KW} * \frac{1 \text{ hp}}{0.7457} = 7.04 \text{ hp}$$

#### 4.3.4.2. Cálculo de las velocidades de rotación del molino

$$V_{mol} = \frac{V_{motor} * \phi_{polea \ mol}}{\phi_{polea \ motor}}$$

Dónde:

$\phi$  polea del motor (80 mm)

$\phi$  polea del molino (130 mm)

velocidad motor rotación (3450 rpm)

$$V_{mol} = \frac{V_{motor} * \phi_{polea \ mol}}{\phi_{polea \ motor}}$$

$$V_{mol} = \frac{3450 \text{ rpm} * 130 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} = 5606.25 \text{ rpm}$$

#### 4.3.4.3. Determinación de la constante del molino

$$k = \frac{P}{m * \ln \frac{D_{pa}}{D_{pb}}}$$

Dónde:

P = Potencia del molino (kW)

k = constante del molino (kW h/ton)

m = alimentación (ton/h)

Dpa = Diámetro del 80% de la alimentación (mm)

Dpb = Diámetro del 80% del producto (mm)

$$k = \frac{5.25}{1.321 * \ln \frac{0.8}{0.36}} = 4.98$$

#### 4.3.4.4. Volumen de alimentación

$$V_{mol} = \frac{m_{mol}}{\rho_{pasto}}$$

$$V_{mol} = \frac{110.78 \text{ Kg}}{900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.123 \text{ m}^3$$

#### 4.3.4.5. Cálculo del volumen de la carcasa del equipo

Para evitar problemas con el arranque del motor se usa el 30% de llenado de la materia prima.

$$V_{ce} = \frac{V_{mol}}{\%llenado} * 100 \quad (\text{Ec. 27 - 4})$$

$$V_{ce} = \frac{0.123 \text{ m}^3}{30} * 100 = 0.41 \text{ m}^3$$

#### 4.3.4.6. Dimensiones del molino

Considerando que la carcasa es de forma cilíndrica.

$$h_{ce} = \frac{V_{ce}}{\pi * r^2} \quad (\text{Ec. 28 - 4})$$

Dónde:

r = radio de la base (0.288m)

hc = altura de la cáscara (m)

$$h_{ce} = \frac{0.41 \text{ m}^3}{3.1416 * (0.288 \text{ m})^2} = 0.226 \text{ m}$$

#### 4.3.4.7. Cálculo de masa de los martillos

Según (Valdivieso 2020), recomiendan que los martillos deben estar separados 2,5 a 7,5 cm y girar a una velocidad de 2500 a 4000 rpm; y su velocidad puede ser entre 75 y 100 metros por segundo. Finalmente, el espesor del martillo puede ser de 0,28 a 0,3 cm, la altura del martillo 8 cm, la longitud del martillo entre 3,5 a 4 cm, y finalmente el diámetro de abertura para el tren de martillo de 1 cm.

$$V_{martillo} = \text{espesor} * \text{altura} * \text{longitud}$$

$$V_{martillo} = 0.29 * 8 * 4 = 9.28 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ m}^3}{(100 \text{ cm})^3} = 9.28 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Volumen de abertura del tren:

$$V_{abertura\ tren} = \pi * e * \left(\frac{\phi}{2}\right)^2$$

$$V_{aberturatren} = 3.1416 * 0.29 * \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0.228 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ m}^3}{(100 \text{ cm})^3} = 2.28 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$V_T = V_{martillo} + V_{aberturatren}$$

$$V_T = 9.28 * 10^{-6} \text{ m}^3 + 2.28 * 10^{-7} \text{ m}^3 = 9.5 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

El acero para la construcción se tomará el DF-2 que tiene por densidad  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ .

$$m_{martillo} = 9.5 * 10^{-6} \text{ m}^3 * 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.074 \text{ Kg}$$

#### 4.3.4.8. Cálculo de la velocidad tangencial de los martillos

$$W = r * \omega_m$$

Dónde:

$W$  = Velocidad tangencial molino (m/s)

$r$  = radio entre la punta de martillo y el centro del eje del molino (m)

$\omega_m$  = velocidad angular de los martillos (rad/s)

Se selecciona una velocidad angular de 3400 rpm.

$$\omega_m = 3400 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 356.048 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$W = 0.116 \text{ m} * 356.048 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 41.30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### 4.3.4.9. Cálculo del factor dependiente de la velocidad de rotación de los martillos

De acuerdo con (Valdivieso 2020) interpolamos el valor en función de la velocidad tangencial para  $W = 41.30 \text{ m/s}$  tenemos un factor ( $f$ ) de 0.001305.

#### 4.3.4.10. Cálculo del número de martillos

$$e = \frac{n * 8 * 100000 * n_m}{G * r^2 * n^3 * f}$$

Dónde:

$G$  = Peso del martillo (kg)

$r$  = Radio que describe el martillo (m)

$n$  = número de vueltas por minuto del rotor

$e$  = Número de martillos

$f$  = factor de pendiente de velocidad de rotación de los martillos

$n_m$  = Eficiencia mecánica del motor (0,7)

$$e = \frac{1 * 8 * 100000 * 0.7}{0.074 * (0.007)^2 * 3000^3 * 0.001305} = 25 \text{ martillos}$$

#### 4.3.4.11. Cálculo de la torsión ejercida por el motor de molino

$$T_{motor} = \frac{P * 100}{2 * \pi * f * g}$$

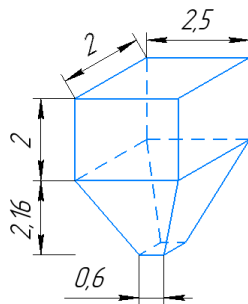
Dónde:

$T_{motor}$  = momento de torsión aplicado al molino (Nm)

$g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$$T_{motor} = \frac{2.25 \text{ KW} * 100}{2 * \pi * 0.001305 * 9.8 \text{ m/s}^2} = 2801.99 \text{ Nm}$$

#### 4.3.4.12. Dimensiones de la tolva de alimentación



$$V_T = V_1 + V_2$$

$$V_1 = L_1 * L_2 * L_3$$

$$V_1 = 2m * 2m * 2.5m = 10m^3$$

$$V_2 = \frac{1}{3} * [h * (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2})]$$

$$A_1 = L_1 * L_2 = 2m * 2.5m = 5m^2$$

**Gráfico 5-4:** Dimensiones de la tolva de alimentación.

Elaborado: Briones, Javier 2021

$$A_2 = e * d = 0.6m * 0.6m = 0.36m^2$$

$$V_2 = \frac{1}{3} * [2.16m * (5m^2 + 0.36m^2 + \sqrt{5m^2 * 0.36m^2})] = 1.738m^3$$

Volumen final de la tolva de alimentación:

$$V_T = 10m^3 + 1.738m^3 = 11.738m^3$$

#### 4.3.5. Tamices vibratorios

##### 4.3.5.1. Cálculo del volumen del tamiz

$$V_t = \frac{m}{\rho_{\text{Pasto Elefante}}} * F_S$$

Dónde:

FS = factor de paso para tamiz (1.2)

$$V_t = \frac{106.08 \text{ Kg}}{900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} * 1.2 = 0.141 \text{ m}^3$$

Siendo el porcentaje de rechazo del 6% en la malla de 260  $\mu\text{m}$ . La capacidad unitaria se determina con la siguiente fórmula:

$$C_U = Q * \frac{H}{H_0} * \frac{\rho}{1.5} * F1 * F2 * F8$$

Dónde:

Q = Capacidad base (0,1708 ton/m<sup>2</sup>h)

H = Porcentaje en huecos de la criba (65)

H<sub>0</sub> = Capacidad base (31,64)

$\rho$  = Densidad del pasto (0.992 ton/m<sup>3</sup>)

F1 = Factor de corrección por la desviación de la forma de los granos (1)

F2 = Factor para cribas horizontales (0,80)

F8 = Factor de corrección del contenido de humedad del producto

$$C_U = 0.1708 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2\text{h}} * \frac{65}{31.64} * \frac{0.992 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}}{1.5} * 1 * 0.80 * 0.80 = 0.148 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2\text{h}}$$

La superficie del tamiz se calcula:

$$S = \frac{T}{C_U} * F_S$$

Dónde:

T = Flujo másico tratado (ton/h)

S = Superficie de la criba (m<sup>2</sup>)

$$S = \frac{0.1169 \frac{\text{ton}}{\text{h}}}{0.148 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2\text{h}}} * 1.2 = 0.947 \text{ m}^2$$

#### 4.3.5.2. Cálculo del diámetro del tamiz

$$\phi = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * 0.947 \text{ m}^2}{3.1416}} = 1.098 \text{ m}^2$$

#### 4.3.6. Recipiente industrial para Extracción de extraíbles

Masa de materia prima: 97.26 Kg

Masa de agua: 1650 Kg

Volumen de la materia prima:



$$V_{\text{Pasto}} = \frac{97.26 \text{ Kg}}{900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.108 \text{m}^3$$

Volumen del agua:

$$V_{\text{agua}} = \frac{1650 \text{ Kg}}{997 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 1.654 \text{m}^3$$

Volumen total considerando un factor de seguridad del 20%:

$$V_T = (0.108 \text{m}^3 + 1.654 \text{m}^3) 1.2 = 2.115 \text{m}^3$$

4.3.6.1. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_T}{2 * \pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 2.115 \text{m}^3}{2 * \pi}} = 1.10 \text{m}$$

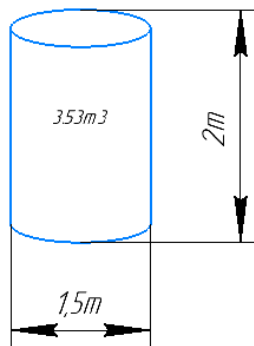
4.3.6.2. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 1.10 \text{m} * 1.6 = 1.76 \text{m}$$

4.3.6.3. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:



$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} * (1.5 \text{m})^2 * 2 \text{m} = 3.53 \text{m}^3$$

**Gráfico 6-4:** Dimensiones del recipiente del tanque.

Elaborado: Briones, Javier 2021

#### 4.3.6.4. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{V_{materia}}{\#tanque} * 100$$
$$\%V = \frac{2.115m^3}{3.53m^3} * 100 = 59.91\%$$

#### 4.3.6.5. Altura de chaqueta de calentamiento de la marmita

$$h_{ch} = \frac{h_T}{(1 + f)}$$

Dónde:

$h_T$ : Altura del tanque de la marmita;

$f$ : Factor seguridad; 0.2 adimensional

$$h_{ch} = \frac{2m}{(1 + 0.2)} = 1.67m$$

#### 4.3.6.6. Diámetro de la chaqueta de calentamiento

$$\phi_{ch} = \frac{1}{10} \phi = \frac{1}{10} 1.5m = 0.15m$$

#### 4.3.6.7. Cantidad de calor requerido

$$Q_{pastro} = 97.26 Kg * 1.348 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ C} * (100^\circ C - 22^\circ C) = 10226.30 KJ$$

$$Q_{H_2SO_4} = 1650Kg * 4.193 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ C} * (100^\circ C - 22^\circ C) = 539639.1 KJ$$

$$Q_T = 10226.30 KJ + 539639.1 KJ = 549865.4 KJ$$

### 4.3.7. Estufa de secado para la materia prima luego de extraíbles

#### 4.3.7.1. Volumen de materia prima que entra a la estufa

$$V_t = \frac{165.36 Kg}{900 \frac{Kg}{m^3}} = 0.1837 m^3$$

#### 4.3.7.2. Volumen del secador

$$V_s = L * a * h_s$$

Largo = 1,1 m

Ancho = 0,7 m

Alto = 1,0 m

$$V_s = 1.0m * 0.7m * 1.1m = 0.77m^3$$

Aplicamos un factor de seguridad de 20%:

$$V_t = 0.77 m^3 * 1.20 = 0.924 m^3$$

#### 4.3.7.3. Cálculo de calor necesario para secar la materia prima

$$Q_a = D * C_{p(\text{pasto elefante})} * \Delta T$$

Dónde:

D = Cantidad de pasto elefante que sale del secador (kg)

C<sub>p</sub>(pasto elefante) = Calor específico del pasto elefante (KJ/kg °C)

ΔT = Variación de temperatura (° C)

Q<sub>a</sub> = Calor necesario para el secado (° C)

$$Q_a = 71.98 \text{ Kg} * 1.348 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (100^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 7568.26 \text{ KJ}$$

#### 4.3.7.4. Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar el agua

$$Q_b = W_b * C_{p(\text{agua})} * (212 - T_W) + W_b * h_{fg}$$

Dónde:

W<sub>b</sub> = Cantidad de agua evaporada (kg)

C<sub>p</sub> = Calor específico del agua (KJ/kg °C)

h<sub>fg</sub> = Entalpía de evaporación 2449,4 KJ/kg

$$\begin{aligned} Q_b &= 93.38 \text{ Kg} * 4,193 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (212 - 100)^\circ\text{C} + 93.38 \text{ Kg} * 2449.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\ &= 272577.712 \text{ KJ} \end{aligned}$$

#### 4.3.7.5. Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor

$$Q_c = W_b * (h_{ft} - h_{gt})$$

Dónde:

h<sub>gt</sub> = Entalpía de vapor saturado a 50°C, tenemos 2592.1 KJ/kg

hft = Entalpia de vapor saturado a 100°C, tenemos 2675.57 KJ/kg

$$Q_c = 93.38.9Kg * (2675.57 - 2592.1) \frac{KJ}{Kg} = 7794.42 KJ$$

#### 4.3.7.6. Cálculo del calor total de secado

$$Q_T = Q_a + Q_b + Q_c$$

$$Q_T = (7568.26 + 272577.712 + 7794.42)KJ = 287940.40 KJ$$

#### 4.3.7.7. Cálculo del consumo del vapor

$$C_v = \frac{Q_T}{h_{fg}}$$

$$C_v = \frac{287940.40 KJ}{2449,4 KJ/kg} = 117.55 Kg$$

### 4.3.8. Reactor para hidrolisis ácida

#### 4.3.8.1. Volumen del reactor

$$V_{pasto} = \frac{71.98 Kg}{900 \frac{Kg}{m^3}} = 0.124 m^3$$

$$V_{H_2SO_4\ 0.4\%} = \frac{1400 Kg}{1001 \frac{Kg}{m^3}} = 1.39 m^3$$

Volumen de la mezcla de pasto con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.4%:

$$V_{mezcla} = 0.124 m^3 + 1.39 m^3 = 1.514 m^3$$

El reactor permitirá realizar el proceso de lavado y filtrado del producto por lo tanto el volumen requerido de agua es el siguiente:

$$V_{H_2O} = \frac{6400 Kg}{997 \frac{Kg}{m^3}} = 6.41 m^3$$

Volumen requerido:

$$V_r = V_{mezcla} + V_{H_2O}$$

$$V_r = 1.514 m^3 + 6.41 m^3 = 7.924$$

#### 4.3.8.2. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_r}{2 * \pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 7.924m^3}{2 * \pi}} = 1.71m$$

#### 4.3.8.3. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 1.71m * 1.6 = 2.74m$$

#### 4.3.8.4. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} * (2m)^2 * 3m = 9.42m^3$$

#### 4.3.8.5. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{\frac{V_{mezcla}}{\#tanque}}{V_T} * 100$$

$$\%V = \frac{\frac{7.924m^3}{1}}{9.42m^3} * 100 = 84.11\%$$

#### 4.3.8.6. Agitación y potencia del motor

**Tabla 37-4:** Parámetros del agitador del reactor de hidrolisis ácida.

Factor	Ecuación
Diámetro del agitador	$D_a = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Ancho de los baffles	$J = \frac{1}{12} * 2 = 0.17m$
Distancia del agitador al fondo del tanque	$E = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Altura de las aspas	$W = \frac{1}{5} * 0.67m = 0.134m$
Longitud de las aspas	$L = \frac{1}{4} * 0.67 = 0.17m$

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

#### 4.3.8.7. Número de Reynolds y número de potencia

El agitador tiene un rango de velocidad de 50 a 500 rpm, por la consistencia de la mezcla se optó la velocidad de agitación de 250 rpm.

$$n = 250rpm = 4.167 rps$$

$$Re = \frac{\rho * n * D_a^2}{\mu} = \frac{900 \frac{Kg}{m^3} * 4.167rps * (0.67m)^2}{0.0042 \frac{Kg}{m * s}} = 400835.63$$

De acuerdo con (Harriot, Smith y McCabe 2007) cuando  $Re > 10^4$  entonces  $Np = KT$ , por lo tanto para un agitador tipo turbina de seis aspas  $Np = 5.75$ .

La potencia del motor:

$$P = \frac{Np * D_a^5 * n^3 * \rho}{g} = \frac{5.75 * (0.67m)^5 * (4.167rps)^3 * 900 \frac{Kg}{m^3}}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 5169.23W$$

$$P = 5.16KW = 6.91hp$$

#### 4.3.8.8. Temperatura de diseño

$$T_{diseño} = T_{trabajo} + 50^\circ C = 60^\circ C + 50^\circ C = 110^\circ C$$

#### 4.3.8.9. Presión de diseño

Para determinar la presión de diseño del reactor se aumenta en un 10% la presión de trabajo (GONZÁLVEZ et al. 2016):

$$P_{diseño} = 1.1 * 5 bar = 5.5bar$$

#### 4.3.8.10. Grosor de las paredes del reactor

Por las condiciones de trabajo del reactor el material de construcción se recomienda que sea de acero inoxidable 304L, la tolerancia a la corrosión tiene un valor de 2mm y el factor de soldadura es de 0.85.

$$G_p = \frac{P_c * R_{ic}}{S * E - 0.6 * P_c} + C.A = \frac{5.5bar * 1000mm}{1038.73bar * 0.85 - 0.6 * 5.5bar} + 2mm = 9.25mm$$

#### 4.3.8.11. Diámetro externo del cilindro

$$D_{externo} = D_{cilindro} + 2 * G_p = 2m + 2 * 0.00925 = 2.018m$$

#### 4.3.8.12. Tapa y fondo

$$t_{tapa} = \frac{P_c * L * M}{2 * S * E - 0.2 * P_c} + C.A$$

$$L = 100\% * D = 2m$$

$$r = 10\% * D = 0.2m$$

$$\frac{L}{r} = \frac{2m}{0.2m} = 10$$

La relación L/r permite encontrar M, el cual es un valor de 1.54.

$$t_{tapa} = \frac{5.5 \text{ bar} * 2m * 1.54}{2 * 1038.73 \text{ bar} * 0.85 - 0.2 * 5.5 \text{ bar}} + 0.002 \text{ mm} = 0.01137m$$

#### 4.3.8.13. Diámetro externo de la tapa y fondo

$$D_{externo} = D_{cilindro} + 2 * t_{tapa} = 2m + 2 * 0.01137m = 2.0227m$$

#### 4.3.8.14. Altura de la tapa y fondo

$$DH = 0.1935 * D_{cilindro} - 0.455 * t_{tapa} = 0.1935 * 2m - 0.455 * 0.01137 = 0.3921m$$

#### 4.3.8.15. Altura del cilindro del reactor

$$h_{total} = h + 2 * h_{tapa} = 3m + 2 * 0.3921m = 3,784m$$

#### 4.3.8.16. Cantidad de calor requerido

$$Q_{pasto} = 71.98 \text{ Kg} * 1.348 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} * (60^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 3687.10 \text{ KJ}$$

$$Q_{H_2SO_4} = 1400 \text{ Kg} * 1.34 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} * (60^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 71288 \text{ KJ}$$

$$Q_T = 3687.10 \text{ KJ} + 71288 \text{ KJ} = 74975.1 \text{ KJ}$$

#### 4.3.8.17. Altura de chaqueta de calentamiento

$$h_{ch} = \frac{3m}{(1 + 0.2)} = 2.5m$$

#### 4.3.8.18. Diámetro de la chaqueta de calentamiento

$$\phi_{ch} = \frac{1}{10} \phi = \frac{1}{10} 2m = 0.2m$$

#### 4.3.9. Estufa de secado para la pasta de celulosa luego de hidrolisis acida

##### 4.3.9.1. Volumen de materia prima que entra a la estufa

$$V_t = \frac{106.38 \text{ Kg}}{900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.1182 \text{ m}^3$$

##### 4.3.9.2. Volumen del secador

$$V_s = L * a * h_s$$

Largo = 1,0 m

Ancho = 0,7 m

Alto = 1,0 m

$$V_s = 1.0\text{m} * 0.7\text{m} * 1. \text{m} = 0.7\text{m}^3$$

Aplicamos un factor de seguridad de 20%:

$$V_t = 0.7 \text{ m}^3 * 1.20 = 0.84 \text{ m}^3$$

##### 4.3.9.3. Cálculo de calor necesario para secar la materia prima

$$Q_a = D * C_p * \Delta T$$

Dónde:

D = Cantidad de pasto elefante que sale del secador (kg)

Cp(pasto elefante) = Calor específico del pasto elefante (KJ/kg °C)

ΔT = Variacion de temperatura (° C)

Qa = Calor necesario para el secado (° C)

$$Q_a = 106.38 \text{ Kg} * 1.348 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (100^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 11185.21 \text{ KJ}$$

##### 4.3.9.4. Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar el agua

$$Q_b = W_b * C_{p(\text{agua})} * (212 - T_W) + W_b * h_{fg}$$

Dónde:

Wb = Cantidad de agua evaporada (kg)

Cp = Calos específico del agua (KJ/kg °C)

hfg = Entalpía de evaporación 2449,4 KJ/kg

$$\begin{aligned} Q_b &= 45.42 \text{ Kg} * 4,193 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (212 - 100)^\circ\text{C} + 45.42 \text{ Kg} * 2449.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\ &= 89921.798 \text{ KJ} \end{aligned}$$



#### 4.3.9.5. Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor

$$Q_c = W_b * (h_{ft} - h_{gt})$$

Dónde:

$h_{gt}$  = Entalpia de vapor saturado a 50°C, tenemos 2592.1 KJ/kg

$h_{ft}$  = Entalpia de vapor saturado a 100°C, tenemos 2675.57 KJ/kg

$$Q_c = 45.42 \text{Kg} * (2675.57 - 2592.1) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 3790.37 \text{KJ}$$

#### 4.3.9.6. Cálculo del calor total de secado

$$Q_T = Q_a + Q_b + Q_c$$

$$Q_T = (11185.21 + 89921.798 + 3790.37) \text{KJ} = 104897.38 \text{KJ}$$

#### 4.3.9.7. Cálculo del consumo del vapor

$$C_v = \frac{Q_T}{h_{fg}}$$

$$C_v = \frac{104897.38 \text{KJ}}{2449,4 \text{KJ/kg}} = 42.82 \text{Kg}$$

#### 4.3.10. Reactor para hidrolisis alcalina

##### 4.3.10.1. Volumen del reactor

$$V_{\text{pasta}} = \frac{60.96 \text{Kg}}{900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.0677 \text{m}^3$$

$$V_{\text{NaOH 20\%}} = \frac{1350 \text{Kg}}{1219.1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 1.107 \text{m}^3$$

Volumen de la mezcla con NaOH 20%:

$$V_{\text{mezcla}} = 0.0677 \text{m}^3 + 1.107 \text{m}^3 = 1.1747 \text{m}^3$$

El reactor permitirá realizar el proceso de lavado y filtrado del producto por lo tanto el volumen requerido de agua es el siguiente:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{6150 \text{Kg}}{997 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 6.16 \text{m}^3$$

Volumen requerido:

$$V_r = V_{\text{mezcla}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_r = 1.1747m^3 + 6.41 m^3 = 7.34 m^3$$

#### 4.3.10.2. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_r}{2 * \pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 7.34m^3}{2 * \pi}} = 1.67m$$

#### 4.3.10.3. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 1.67m * 1.6 = 2.67m$$

#### 4.3.10.4. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} * (2m)^2 * 3m = 9.42m^3$$

#### 4.3.10.5. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{V_{mezcla}}{\#tanque * V_T} * 100$$

$$\%V = \frac{7.34m^3}{1 * 9.42m^3} * 100 = 77.91\%$$

#### 4.3.10.6. Agitación y potencia del motor

**Tabla 38-4:** Parámetros del agitador del reactor de hidrolisis alcalina.

Factor	Ecuación
Diámetro del agitador	$D_a = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Ancho de los baffles	$J = \frac{1}{12} * 2 = 0.17m$

**Distancia del agitador al fondo del tanque**

$$E = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$$

**Altura de las aspas**

$$W = \frac{1}{5} * 0.67m = 0.134m$$

**Longitud de las aspas**

$$L = \frac{1}{4} * 0.67 = 0.17m$$

---

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

#### 4.3.10.7. Número de Reynolds y número de potencia

El agitador tiene un rango de velocidad de 50 a 500 rpm, por la consistencia de la mezcla se optó la velocidad de agitación de 250 rpm.

$$n = 250rpm = 4.167 rps$$

$$Re = \frac{\rho * n * D_a^2}{\mu} = \frac{900 \frac{Kg}{m^3} * 4.167rps * (0.67m)^2}{0.0042 \frac{Kg}{m * s}} = 400835.63$$

De acuerdo con (Harriot, Smith y McCabe 2007) cuando  $Re > 10^4$  entonces  $Np = KT$ , por lo tanto para un agitador tipo turbina de seis aspas  $Np = 5.75$ .

La potencia del motor:

$$P = \frac{Np * D_a^5 * n^3 * \rho}{g} = \frac{5.75 * (0.67m)^5 * (4.167rps)^3 * 900 \frac{Kg}{m^3}}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 5169.23W$$

$$P = 5.16KW = 6.91hp$$

#### 4.3.10.8. Temperatura de diseño

$$T_{diseño} = T_{trabajo} + 50^\circ C = 60^\circ C + 50^\circ C = 110^\circ C$$

#### 4.3.10.9. Presión de diseño

Para determinar la presión de diseño del reactor se aumenta en un 10% la presión de trabajo (González *et al.* 2016):

$$P_{diseño} = 1.1 * 5 bar = 5.5bar$$

#### 4.3.10.10. Grosor de las paredes del reactor

Por las condiciones de trabajo del reactor el material de construcción se recomienda que sea de acero inoxidable 304L, la tolerancia a la corrosión tiene un valor de 2mm y el factor de soldadura es de 0.85.

$$G_p = \frac{P_c * R_{ic}}{S * E - 0.6 * P_c} + C.A = \frac{5.5bar * 1000mm}{1038.73bar * 0.85 - 0.6 * 5.5bar} + 2mm = 9.25mm$$

#### 4.3.10.11. Diámetro externo del cilindro

$$D_{externo} = D_{cilindro} + 2 * G_p = 2m + 2 * 0.00925 = 2.018m$$

#### 4.3.10.12. Tapa y fondo

$$t_{tapa} = \frac{P_c * L * M}{2 * S * E - 0.2 * P_c} + C.A$$

$$L = 100\% * D = 2m$$

$$r = 10\% * D = 0.2m$$

$$\frac{L}{r} = \frac{2m}{0.2m} = 10$$

La relación L/r permite encontrar M, el cual es un valor de 1.54.

$$t_{tapa} = \frac{5.5 bar * 2m * 1.54}{2 * 1038.73bar * 0.85 - 0.2 * 5.5bar} + 0.002mm = 0.01137m$$

#### 4.3.10.13. Diámetro externo de la tapa y fondo

$$D_{externo} = D_{cilindro} + 2 * t_{tapa} = 2m + 2 * 0.01137m = 2.0227m$$

#### 4.3.10.14. Altura de la tapa y fondo

$$DH = 0.1935 * D_{cilindro} - 0.455 * t_{tapa} = 0.1935 * 2m - 0.455 * 0.01137 = 0.3921m$$

#### 4.3.10.15. Altura del cilindro del reactor

$$h_{total} = h + 2 * h_{tapa} = 3m + 2 * 0.3921m = 3,784m$$

4.3.10.16. *Cantidad de calor requerido*

$$Q_{\text{pasta}} = 60.96 \text{ Kg} * 1.348 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} * (60^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 3122.46 \text{ KJ}$$

$$Q_{\text{NaOH}} = 1350 \text{ Kg} * 1.4653 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} * (60^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 75169.89 \text{ KJ}$$

$$Q_T = 3122.46 \text{ KJ} + 75169.89 \text{ KJ} = 78292.35 \text{ KJ}$$

4.3.10.17. *Altura de chaqueta de calentamiento*

$$h_{ch} = \frac{3\text{m}}{(1 + 0.2)} = 2.5\text{m}$$

4.3.10.18. *Diámetro de la chaqueta de calentamiento*

$$\phi_{ch} = \frac{1}{10} \phi = \frac{1}{10} 2\text{m} = 0.2\text{m}$$

**4.3.11. Estufa de secado para la materia prima luego de hidrolisis alcalina**

4.3.11.1. *Volumen de materia prima que entra a la estufa*

$$V_t = \frac{62.66 \text{ Kg}}{1008,9 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.062 \text{ m}^3$$

4.3.11.2. *Volumen del secador*

$$V_s = L * a * h_s$$

Largo = 1,0 m

Ancho = 0,7 m

Alto = 1,0 m

$$V_s = 1.0\text{m} * 0.7\text{m} * 1.0\text{m} = 0.7\text{m}^3$$

Aplicamos un factor de seguridad de 20%:

$$V_t = 0.7 \text{ m}^3 * 1.20 = 0.84 \text{ m}^3$$

#### 4.3.11.3. Cálculo de calor necesario para secar la materia prima

$$Q_a = D * C_p * \Delta T$$

Dónde:

D = Cantidad de pasta de celulosa que sale del secador (kg)

Cp(pasta celulosa) = Calor específico del pasta celulosa (KJ/kg °C)

$\Delta T$  = Variación de temperatura (° C)

Qa = Calor necesario para el secado (° C)

$$Q_a = 62.66 \text{ Kg} * 1.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (100^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = 6842.47 \text{ KJ}$$

#### 4.3.11.4. Cálculo del calor necesario para calentar y evaporar el agua

$$Q_b = W_b * C_{p(\text{agua})} * (212 - T_W) + W_b * h_{fg}$$

Dónde:

Wb = Cantidad de agua evaporada (kg)

Cp = Calos específico del agua (KJ/kg °C)

hfg = Entalpía de evaporación 2449,4 KJ/kg

$$Q_b = 31.02 \text{ Kg} * 4,193 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (212 - 100)^\circ\text{C} + 31.02 \text{ Kg} * 2449.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 61412.89 \text{ KJ}$$

#### 4.3.11.5. Calor necesario para aumentar la temperatura del vapor

$$Q_c = W_b * (h_{ft} - h_{gt})$$

Dónde:

hgt = Entalpia de vapor saturado a 50°C, tenemos 2592.1 KJ/kg

hft = Entalpia de vapor saturado a 100°C, tenemos 2675.57 KJ/kg

$$Q_c = 31.02 \text{ Kg} * (2675.57 - 2592.1) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 2589.23 \text{ KJ}$$

#### 4.3.11.6. Cálculo del calor total de secado

$$Q_T = Q_a + Q_b + Q_c$$

$$Q_T = (6842.47 + 61412.89 + 2589.23) \text{ KJ} = 70844.59 \text{ KJ}$$

#### 4.3.11.7. Cálculo del consumo del vapor

$$C_v = \frac{Q_T}{h_{fg}}$$
$$C_v = \frac{70844.59 \text{ KJ}}{2449,4 \text{ KJ/kg}} = 28.92 \text{ Kg}$$

#### 4.3.12. Tanque de blanqueo

##### 4.3.12.1. Volumen requerido

$$V_{pulpa} = \frac{31.64 \text{ Kg}}{1008,9 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.031 \text{ m}^3$$

$$V_{NaClO \text{ 5\%}} = \frac{700 \text{ Kg}}{1100 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.63 \text{ m}^3$$

En el aparato se realizará el procedimiento de lavado:

$$V_{H_2O} = \frac{2600 \text{ Kg}}{997 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 2.60 \text{ m}^3$$

$$V_{total} = 0.031 \text{ m}^3 + 0.63 \text{ m}^3 + 2.60 \text{ m}^3 = 3.26 \text{ m}^3$$

##### 4.3.12.2. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_r}{2 * \pi}}$$
$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 3.26 \text{ m}^3}{2 * \pi}} = 1.28 \text{ m}$$

##### 4.3.12.3. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 1.28 \text{ m} * 1.6 = 2.04 \text{ m}$$

#### 4.3.12.4. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} * (1.5m)^2 * 2.5m = 4.42m^3$$

#### 4.3.12.5. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{\frac{V_{mezcla}}{\#tanque}}{V_T} * 100$$

$$\%V = \frac{\frac{3.26m^3}{1}}{4.42m^3} * 100 = 73.75\%$$

#### 4.3.12.6. Agitación y potencia del motor

**Tabla 39-4:** Parámetros del agitador del reactor del tanque de blanqueo.

Factor	Ecuación
<b>Diámetro del agitador</b>	$D_a = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
<b>Ancho de los baffles</b>	$J = \frac{1}{12} * 2 = 0.17m$
<b>Distancia del agitador al fondo del tanque</b>	$E = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
<b>Altura de las aspas</b>	$W = \frac{1}{5} * 0.67m = 0.134m$
<b>Longitud de las aspas</b>	$L = \frac{1}{4} * 0.67 = 0.17m$

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

#### 4.3.12.7. Número de Reynolds y número de potencia

El agitador tiene un rango de velocidad de 50 a 500 rpm, por la consistencia de la mezcla se optó la velocidad de agitación de 250 rpm.

$$n = 250rpm = 4.167 rps$$

$$Re = \frac{\rho * n * D_a^2}{\mu} = \frac{1008.9 \frac{Kg}{m^3} * 4.167rps * (0.67m)^2}{0.15 \frac{Kg}{m * s}} = 12581.43$$

De acuerdo con (Harriot, Smith y McCabe 2007) cuando  $Re > 10^4$  entonces  $Np = KT$ , por lo tanto para un agitador tipo turbina de seis aspas  $Np = 5.75$ .



La potencia del motor:

$$P = \frac{N_p * D_a^5 * n^3 * \rho}{g} = \frac{5.75 * (0.67m)^5 * (4.167rps)^3 * 1008.9 \frac{Kg}{m^3}}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 5782.74W$$
$$P = 5.78KW = 7.75hp$$

#### 4.4. Tanque de recepción de líquido residual de hidrolisis acida y alcalina

##### 4.4.1. Hidrolisis ácida

###### 4.4.1.1. Volumen requerido

$$V_{residual1} = \frac{1361.76 Kg}{1001 \frac{Kg}{m^3}} = 1.360 m^3$$

###### 4.4.1.2. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{residual1}}{2 * \pi}}$$
$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 1.360m^3}{2 * \pi}} = 0.953m$$

###### 4.4.1.3. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 0.953m * 1.6 = 1.524m$$

###### 4.4.1.4. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$
$$V_T = \frac{\pi}{4} * (1.2m)^2 * 2m = 2.26m^3$$

#### 4.4.1.5. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{\frac{V_{residual1}}{\#tanque}}{V_T} * 100$$
$$\%V = \frac{\frac{1.360m^3}{1}}{2.26m^3} * 100 = 60.17\%$$

#### 4.4.2. Hidrolisis alcalina

##### 4.4.2.1. Volumen requerido

$$V_{residual1} = \frac{1332.24 \text{ Kg}}{1008.9 \frac{\text{Kg}}{m^3}} = 1.320 \text{ m}^3$$

##### 4.4.2.2. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{residual1}}{2 * \pi}}$$
$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 1.320m^3}{2 * \pi}} = 0.944m$$

##### 4.4.2.3. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 0.944m * 1.6 = 1.511m$$

##### 4.4.2.4. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$
$$V_T = \frac{\pi}{4} * (1.2m)^2 * 2m = 2.26m^3$$

#### 4.4.2.5. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{\frac{V_{residual1}}{\#tanque}}{V_T} * 100$$
$$\%V = \frac{\frac{1.320m^3}{1}}{2.26m^3} * 100 = 58.40\%$$

#### 4.4.3. Tanques mezcladores de reactivos para hidrolisis acida y alcalina

##### 4.4.3.1. Tanque mezclador para ácido sulfúrico al 0.4%

##### 4.4.3.2. Volumen requerido

Por cada ciclo se necesita de 1400Kg de una solución de ácido sulfúrico al 0.4%

$$V_{H_2SO_4\ 0.4\%} = \frac{1400\ Kg}{1001\ \frac{Kg}{m^3}} = 1.39\ m^3$$

##### 4.4.3.3. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{H_2SO_4\ 0.4\%}}{2 * \pi}}$$
$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 1.39m^3}{2 * \pi}} = 0.96m$$

##### 4.4.3.4. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 0.96m * 1.6 = 1.54m$$

##### 4.4.3.5. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$
$$V_T = \frac{\pi}{4} * (1.2m)^2 * 2m = 2.26m^3$$

#### 4.4.3.6. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{V_{H_2SO_4\ 0.4\%}}{\#tanque} * 100$$

$$\%V = \frac{1.39m^3}{2.26m^3} * 100 = 61.50\%$$

#### 4.4.3.7. Agitación y potencia del motor

**Tabla 40-4:** Parámetros del agitador del mezclador para ácido sulfúrico.

Factor	Ecuación
Diámetro del agitador	$D_a = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Ancho de los baffles	$J = \frac{1}{12} * 2 = 0.17m$
Distancia del agitador al fondo del tanque	$E = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Altura de las aspas	$W = \frac{1}{5} * 0.67m = 0.134m$
Longitud de las aspas	$L = \frac{1}{4} * 0.67 = 0.17m$

Elaborado: Briones, Javier 2021

#### 4.4.3.8. Número de Reynolds y número de potencia

El agitador tiene un rango de velocidad de 50 a 500 rpm, por la consistencia de la mezcla se optó la velocidad de agitación de 150 rpm.

$$n = 150rpm = 2.5\ rps$$

$$Re = \frac{\rho * n * D_a^2}{\mu} = \frac{1001 \frac{Kg}{m^3} * 2.5rps * (0.67m)^2}{0.0267 \frac{Kg}{m * s}} = 42073.86$$

De acuerdo con (Harriot, Smith y McCabe 2007) cuando  $Re > 10^4$  entonces  $Np = KT$ , por lo tanto para un agitador tipo turbina de seis aspas  $Np = 5.75$ .

La potencia del motor:

$$P = \frac{N_p * D_a^5 * n^3 * \rho}{g} = \frac{5.75 * (0.67m)^5 * (2.5rps)^3 * 1001 \frac{Kg}{m^3}}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 1238.99W$$

$$P = 1.23KW = 1.65\ hp$$

#### 4.4.4. Tanque mezclador para hidróxido de sodio al 20%

##### 4.4.4.1. Volumen requerido

Por cada ciclo se necesita de 1350Kg de una solución de hidróxido de sodio al 20%

$$V_{NaOH\ 20\%} = \frac{1350\ Kg}{1219.1 \frac{Kg}{m^3}} = 1.107\ m^3$$

##### 4.4.4.2. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{NaOH\ 20\%}}{2 * \pi}}$$
$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 1.107m^3}{2 * \pi}} = 0.88m$$

##### 4.4.4.3. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 0.88m * 1.6 = 1.42m$$

##### 4.4.4.4. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$
$$V_T = \frac{\pi}{4} * (1.2m)^2 * 2m = 1.26m^3$$

##### 4.4.4.5. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{\frac{V_{NaOH\ 20\%}}{\#tanque}}{V_T} * 100$$
$$\%V = \frac{\frac{1.107m^3}{1}}{2.26m^3} * 100 = 48.98\%$$

#### 4.4.4.6. Agitación y potencia del motor

**Tabla 41-4:** Parámetros del agitador del mezclador de hidróxido de sodio.

Factor	Ecuación
Diámetro del agitador	$D_a = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Ancho de los baffles	$J = \frac{1}{12} * 2 = 0.17m$
Distancia del agitador al fondo del tanque	$E = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Altura de las aspas	$W = \frac{1}{5} * 0.67m = 0.134m$
Longitud de las aspas	$L = \frac{1}{4} * 0.67 = 0.17m$

Elaborado: Briones, Javier 2021

#### 4.4.4.7. Número de Reynolds y número de potencia

El agitador tiene un rango de velocidad de 50 a 500 rpm, por la consistencia de la mezcla se optó la velocidad de agitación de 150 rpm.

$$n = 150rpm = 2.5 rps$$

$$Re = \frac{\rho * n * D_a^2}{\mu} = \frac{1219.1 \frac{Kg}{m^3} * 2.5rps * (0.67m)^2}{0.05134 \frac{Kg}{m * s}} = 139.60$$

Cuándo  $Re > 10^2$  entonces  $Np = KT$ , por lo tanto para un agitador tipo turbina de seis aspas  $Np = 5.0$

La potencia del motor:

$$P = \frac{Np * D_a^5 * n^3 * \rho}{g} = \frac{5 * (0.67m)^5 * (2.5rps)^3 * 1219.1 \frac{Kg}{m^3}}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 1312.13W$$

$$P = 1.31KW = 1.76 hp$$

#### 4.4.5. Tanque mezclador para hipoclorito de sodio al 5%

##### 4.4.5.1. Volumen requerido

Por cada ciclo se necesita de 700Kg de una solución de hipoclorito de sodio al 5%

$$V_{NaClO\ 5\%} = \frac{700\ Kg}{1100 \frac{Kg}{m^3}} = 0.63\ m^3$$

#### 4.4.5.2. Diámetro del tanque

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{NaClO \ 5\%}}{2 * \pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 0.63m^3}{2 * \pi}} = 0.73m$$

#### 4.4.5.3. Altura del tanque

Se relaciona altura/diámetro del tanque en 1.6:

$$h_t = 0.73m * 1.6 = 1.17m$$

#### 4.4.5.4. Volumen del recipiente

Se estandariza las dimensiones para el cálculo del volumen del tanque:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} * (1.2m)^2 * 2m = 1.26m^3$$

#### 4.4.5.5. Capacidad de ocupación del tanque

$$\%V = \frac{V_{NaClO \ 5\%}}{\#tanque} * 100$$

$$\%V = \frac{0.63m^3}{1} * 100 = 27.87\%$$

#### 4.4.5.6. Agitación y potencia del motor

**Tabla 42-4:** Parámetros del agitador del mezclador de hipoclorito de sodio.

Factor	Ecuación
Diámetro del agitador	$D_a = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Ancho de los baffles	$J = \frac{1}{12} * 2 = 0.17m$
Distancia del agitador al fondo del tanque	$E = \frac{1}{3} * 2 = 0.67m$
Altura de las aspas	$W = \frac{1}{5} * 0.67m = 0.134m$
Longitud de las aspas	$L = \frac{1}{4} * 0.67 = 0.17m$

Elaborado: Briones, Javier 2021

#### 4.4.5.7. Número de Reynolds y número de potencia

El agitador tiene un rango de velocidad de 50 a 500 rpm, por la consistencia de la mezcla se optó la velocidad de agitación de 150 rpm.

$$n = 150rpm = 2.5 rps$$

$$Re = \frac{\rho * n * D_a^2}{\mu} = \frac{1100 \frac{Kg}{m^3} * 2.5rps * (0.63m)^2}{0.0038 \frac{Kg}{m * s}} = 159.50$$

Cuando  $Re > 10^2$  entonces  $Np = KT$ , por lo tanto para un agitador tipo turbina de seis aspas  $Np = 5.0$

La potencia del motor:

$$P = \frac{Np * D_a^5 * n^3 * \rho}{g} = \frac{5 * (0.63m)^5 * (2.5rps)^3 * 1100 \frac{Kg}{m^3}}{9.8 \frac{m}{s^2}} = 1514.15W$$

$$P = 1.31KW = 1.76 hp$$

#### 4.5. Descripción del proceso industrial

La tecnología para producir celulosa microcristalina a partir del *Pennisetum Purpureum* consta de los siguientes procesos: Inspección, selección, lavado, troceado, secado, molido, tamizado de la materia prima (pasto elefante), extracción de extraíbles, secado, hidrolisis acida, filtrado, lavado, secado, hidrolisis alcalina, filtrado, lavado, blanqueo, lavado de la pulpa de celulosa, secado, molido y tamizado de la celulosa microcristalina. El proceso empieza en la plantación del pasto elefante, porque los tallos del pasto elefante deben de ser de buena calidad y su contenido de fibra vegetal debe poseer una madurez (60 – 70 días), la obtención de celulosa microcristalina se produce a los dos días de corte el pasto, para que el contenido de humedad sea menor y amenorar el proceso de secado.

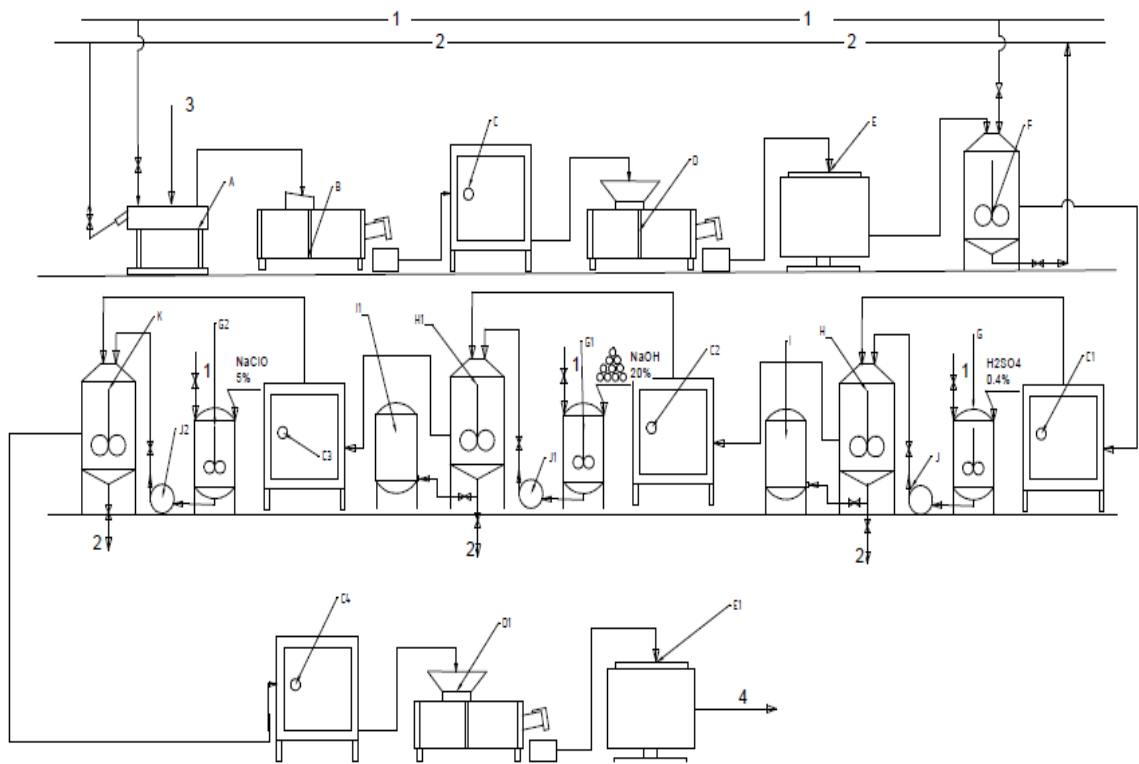
De acuerdo al proceso industrial desarrollado, este empieza en la mesa de selección y lavado (A) donde se seleccionará y limpiará los tallos de cualquier residuo vegetal, para posteriormente lavarlo, los tallos lavados pasan a la picadora industrial (B) para ser troceados, en la secadora industrial (C) se reduce la humedad, el material seco se muele en el molido industrial (D) hasta volverlo polvo y este es tamizado en la tamizadora industrial (E). Posterior al proceso de tamizado el material es introducido en el tanque industrial (F) donde se pone en contacto con agua a 80°C por una hora, el líquido extraerá almidones, taninos y demás sustancias orgánicas, la pasta pasará al secador industrial (C1) por un tiempo de 2 horas a 100°C.

Para inicial el proceso de hidrolisis en el mezclador (G) se prepara una solución de ácido sulfúrico



al 0.4%, la cual se bombea (J) al reactor de hidrolisis acida (H) y se mezcla con el material seco, se mantiene por una hora a 60°C, posteriormente se filtra, el líquido residual es enviado al tanque de almacenamiento (I), y se lava hasta un pH neutro (7), la pasta es llevada al secador industrial (C2) por 2 horas a 100°C.

El proceso de hidrolisis alcalina requiere de una solución de hidróxido de sodio al 20%, la cual se prepara en el mezclador (G1) y bombeada (J1) al reactor (H1), la pasta seca del proceso anterior también es colocada en el reactor, el tiempo de reacción es de 2 horas a 60°C, posterior es filtrado el material y el líquido residual enviado al tanque (I1), la pasta de celulosa es lavada hasta un pH de 7 y llevado a secar (C3) por 2 horas a 100°C. El blanqueo de la pasta de celulosa se realiza a temperatura ambiente en 300 minutos (K), este se realiza en una solución al 5% de hipoclorito de sodio la cual es preparada en el equipo (G2), luego que la pasta se haya blanqueado pasa al secador (C4) por un tiempo de 3 horas a 80°C, luego es molida(D1) y tamizada (E1) obteniendo un polvo semiblanco característica de la celulosa microcristalina, el proceso industrial se muestra en el gráfico 5 – 4.



**Gráfico 7-4:** Proceso industrial de obtención de celulosa microcristalina a partir del Pennisetum Purpureum.

**Elaborado:** Briones, Javier 2021

## **4.6. Comprobación de hipótesis**

### **4.6.1. Hipótesis 1**

H<sub>0</sub> = No se puede caracterizar la materia prima (*Pennisetum Purpureum*) mediante métodos físico-químicos según normativas.

H<sub>i</sub> = Se puede caracterizar la materia prima (*Pennisetum Purpureum*) mediante métodos físico-químicos según normativas.

Se rechaza H<sub>0</sub>, y se acepta la hipótesis alternativa debido a que la materia prima utilizada para obtención de celulosa microcristalina es apta, los análisis físico-químicos que se realizaron de acuerdo a las normas ANSI (American Society for Testing and Materials) y TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industries) determinaron las características de la materia prima, los resultados se encuentran en la tabla 1 – 4 y al compararlos con investigaciones de (Segura, *et al* 2008; van Cleef et al. 2012; Cazco Barba 2017) se concluye que están dentro de los márgenes del tipo de material vegetal.

### **4.6.2. Hipótesis 2**

H<sub>0</sub> = No influye en el rendimiento de obtención de celulosa microcristalina la modificación de variables y parámetros de operación a nivel de laboratorio.

H<sub>i</sub> = Si influye en el rendimiento de obtención de celulosa microcristalina la modificación de variables y parámetros de operación a nivel de laboratorio.

Se rechaza H<sub>0</sub>, y se afirma que influye la modificación de variables y parámetros de operación en el rendimiento de obtención de celulosa microcristalina como se observa en las tablas, donde se muestran las medias de los resultados del peso final seco del producto obtenido y su rendimiento según el tipo de tratamiento realizado. Además, se afirma que al realizar la prueba de comparación múltiple de TUKEY con un nivel de confianza del 95 %, la variable y los parámetros que permiten obtener un mayor rendimiento del producto son los que se muestran en la tabla 4 – 4.

### **4.6.3. Hipótesis 3**

H<sub>0</sub> = No se puede realizar cálculos ingenieriles para escalar el proceso de obtención de celulosa microcristalina a partir de los datos obtenidos del laboratorio.

H<sub>i</sub> = Se puede realizar cálculos ingenieriles para escalar el proceso de obtención de celulosa microcristalina a partir de los datos obtenidos del laboratorio.

Se rechaza  $H_0$ , y se acepta la hipótesis alternativa ya que los parámetros y variables obtenidos de laboratorio, fueron bases para el desarrollo de los cálculos ingenieriles del escalado del proceso, el diseño del proceso industrial se proyectó para trabajar con 500 kg/día de materia prima, los datos de balance y diseños de equipos se observan en los numerales 4.2 – 4.3 y el esquema tecnológico se encuentra en el anexo.

#### **4.6.4. Hipótesis 4**

$H_0$  = No se puede caracterizar la celulosa microcristalina obtenida mediante métodos físico-químicos según normativas para validar el diseño.

$H_i$  = Se puede caracterizar la celulosa microcristalina obtenida mediante métodos físico-químicos según normativas para validar el diseño.

Se rechaza  $H_0$ , y se acepta la hipótesis alternativa debido a que los análisis físico-químicos que se realizaron de acuerdo a las normas INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y en conjunto con las ANSI (American Society for Testing and Materials) y TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industries) determinaron las características del producto final obtenido, los resultados se encuentran en las tablas 11, 12, 13 – 4 y al compararlos con las especificaciones establecidas por el Reglamento (CE) n°1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre aditivos alimentarios, con respecto a la celulosa microcristalina obtenida a partir del *Pennisetum Purpureum* cumple con parámetros de pH, humedad y solubilidad, lo contrario para los parámetros de pureza y % de cenizas para poder ser grado alimenticio o farmacéutico y se deja abierto a la posibilidad de estudio en campos industriales diferentes a los ya mencionados.

#### **4.7. Discusión de resultados**

En la presente investigación se evaluó al *Pennisetum Purpureum* (pasto elefante) como materia prima para la obtención de celulosa microcristalina, aplicando métodos de hidrólisis bajo diferentes tratamientos tomando el de mayor eficacia para el diseño de un proceso industrial para su producción a pequeña escala.

El tipo de investigación aplicado fue exploratorio-descriptivo, ya que, mediante referencias bibliográficas sobre los métodos de hidrólisis en fibras vegetales, se estableció una formulación para la extracción de celulosa microcristalina a nivel de laboratorio, que posteriormente utilizando fundamentos de operaciones unitarias y cálculos ingenieriles se diseñó un escalado industrial del proceso.

La investigación partió con la caracterización de la materia prima donde se tomó parámetros establecidos por las normas del Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), para conocer las características físico-químicas de la materia vegetal: humedad 79.2%, ceniza 13.30%, hemicelulosa 29.75%, lignina 9.53%, celulosa 37.26% y sustancias extraíbles 20.61% en porcentaje de peso, los resultados fueron comparados con investigación de (Segura, Echeverri y Mejía 2008; van Cleef et al. 2012; Cazco Barba 2017) estos se encuentran dentro de los márgenes del tipo de material vegetal, por el contenido de material lignocelulósico y aspectos biológicos de la especie, como la rápida madurez que alcanza la fibra vegetal en tiempo es considerado como una fuente para la extracción de pulpa de celulosa.

Se aplicó un diseño multifactorial de dos factores para el desarrollo del modelo experimental, el modelo estadístico contó con un número de 3 repeticiones, 6 tratamientos y el nivel de significancia del 5%, para las pruebas de laboratorio. Se estableció aplicar ácido sulfúrico al 0.4% a todos los tratamientos, la hidrólisis ácida se realizó en un tiempo de 60min a 60°C, mientras que para la hidrólisis alcalina se trabajó con concentraciones de 10%, 20% y 30% de solución de hidróxido de sodio por un tiempo de 120 min a 60°C, para el blanqueo también se varió las concentraciones de hipoclorito de sodio 2% y 5% a temperatura ambiente por 300 min, tomando como variable de respuesta el rendimiento y pureza de celulosa.

Mediante un análisis estadístico y comparaciones según Tukey para las variables de respuesta. Para determinar estadísticamente la diferencia de los rendimientos se aplica la prueba de Tukey, los resultados muestran las diferencias de las medias para cada tratamiento con su intervalo respectivo y los valores para cada contraste con respecto al porcentaje de rendimiento obtenido, tomando en consideración los tratamientos con mayor rendimiento se contempla el T2 (37.95%) y T5 (37.57%), los cuales presentan un nivel de significancia menor al p-value, siendo sus medias promedio estadísticamente similares.

Los tratamientos presentan una pureza de celulosa superior al 50%, siendo el tratamiento 2 el de mayor con un 74.74 %, el análisis de varianza reporta diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05^{**}$ ) y que las medias de las repeticiones para cada tratamiento son diferentes, la prueba de comparaciones múltiples con respecto a los tratamientos T5 – T2, muestra diferencias significativas en sus valores de pureza, siendo el T2 más significativo por poseer mayor pureza.

Las propiedades físico-químicas del producto se determinaron de acuerdo a las normas INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y en combinación con las normas ANSI (American Society for Testing and Materials) y TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industries), las características son: ceniza 1.8%, pureza de celulosa 74.74%, humedad 4.3%, pH

6.8, el tamaño de partícula es de aproximadamente 0.1050 mm al pasar más del 50% por una malla de 140, insolubilidad en CH<sub>3</sub>COOH 20%, NaClO 5%, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 15%, HCl 10%, etanol 98% y agua.

La comparación se llevó a cabo bajo las especificaciones establecidas por el Reglamento (CE) n°1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre aditivos alimentarios, con respecto a la celulosa microcristalina, esta cumple con parámetros de pH, humedad y solubilidad, lo contrario para los parámetros de pureza y % de cenizas para poder ser grado alimenticio o farmacéutico según las características estipuladas por (Comisión del Parlamento Europeo 2012). Dado producto se deja abierto a la posibilidad de estudio en campos industriales diferentes a los ya mencionados.

El diseño del proceso se realizó en función de 500 kg/día, de tipo continuó, obteniendo 21.64 kg/día de celulosa microcristalina, para ello se identificó las variables y parámetros de laboratorio para el escalado y cálculos ingenieriles de los equipos, se definió las etapas del proceso: Inspección, selección, lavado, troceado, secado, molido, tamizado de la materia prima (pasto elefante), extracción de extraíbles, secado, hidrolisis acida, filtrado, lavado, secado, hidrolisis alcalina, filtrado, lavado, blanqueo, lavado de la pulpa de celulosa, secado, molido y tamizado de la celulosa microcristalina, a partir de estas se graficó el esquema tecnológico que tendrá el diseño.

## CONCLUSIONES

La caracterización del pasto elefante (*Pennisetum Purpureum*) se realizó mediante métodos físicos-químicos de acuerdo a las normas del Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), con resultados de: humedad 79.2%, ceniza 13.30%, hemicelulosa 29.75%, lignina 9.53%, celulosa 37.26% y sustancias extraíbles 20.61% en porcentaje de peso, estos se encuentran dentro de los márgenes del tipo de material vegetal, por el contenido de material lignocelulósico y aspectos biológicos de la especie, como la rápida madurez que alcanza la fibra vegetal en tiempo, es considerado como una fuente para la extracción de pulpa de celulosa.

Las variables y parámetros identificados en la obtención de la celulosa microcristalina en el laboratorio que permitieron un rendimiento del 37.95%, fueron la utilización de hidróxido de sodio al 20%, temperatura de 60°C, tiempo 120 minutos en la hidrolisis alcalina y en el blanqueo de la pulpa, hipoclorito de sodio al 5%, temperatura 25°C por 300 minutos, parámetros controlados para evitar irregularidades en el proceso y producto final.

Los cálculos de ingeniería para el diseño de cada uno de los equipos que intervienen en el proceso, se realizó con los datos obtenidos de la parte experimental en base a una capacidad de ingreso de materia prima de 500kg/día que permite obtener 21.64 kg de producto final, los equipos que se incluyen son mesa de selección y lavado, picadora, molinos industriales, tamizadores industriales, estufas de secado, tanques de almacenamiento, tanques mezcladores de líquidos, reactores, tanque de blanqueo y tanques de calentamiento, contemplados en la línea del proceso anexo.

La validación del proceso diseñado mediante pruebas físico-químicas del producto obtenido se realizó bajo métodos de las normas INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), ANSI (American Society for Testing and Materials) y TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industries), la celulosa microcristalina obtenida presenta las siguientes características: ceniza 1.8%, pureza de celulosa 74.74%, humedad 4.3%, pH 6.8, el tamaño de partícula es de aproximadamente 0.1050 mm al pasar más del 50% por una malla de 140, insolubilidad en  $\text{CH}_3\text{COOH}$  20%,  $\text{NaClO}$  5%,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  15%,  $\text{HCl}$  10%, etanol 98% y agua. La pureza obtenida no es la adecuada para ser utilizada como aditivo alimenticio, pero se abre la posibilidad de estudio para su utilización en otro tipo de industria.

## **RECOMENDACIONES**

Realizar un estudio económico sobre la alternativa de utilizar el pasto elefante (*Pennisetum Purpureum*) para obtener celulosa microcristalina, que analicen la viabilidad de la investigación.

Investigar diversos tipos de métodos para obtener celulosa micro cristalina a partir del pasto elefante, con la finalidad de mejorar sus características y rendimiento del proceso para futuras investigaciones.

Realizar estudios sobre las áreas y aplicaciones donde se podría utilizar el material obtenido con pureza del 74.74%.

## **GLOSARIO**

**BIOMASA LIGNOCELULÓSICA:** Material orgánico compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, presente en los tejidos vegetales como el Pennisetum purpureum.

**CARACTERIZACIÓN:** Análisis y descripción de las propiedades físicas y químicas de la celulosa microcristalina obtenida, como tamaño de partícula, morfología y pureza.

**CELULOSA:** Polisacárido que forma la estructura principal de las paredes celulares de las plantas, compuesto por cadenas lineales de glucosa.

**CRISTALINIDAD:** Grado de ordenamiento y estructura cristalina presente en la celulosa microcristalina.

**ESTABILIDAD TÉRMICA:** Capacidad de la celulosa microcristalina para resistir altas temperaturas sin descomponerse o degradarse.

**HIDRÓLISIS ÁCIDA:** Método de descomposición de la celulosa mediante la aplicación de un ácido, que rompe los enlaces químicos y produce azúcares más simples.

**HIDRÓLISIS BÁSICA:** Método de descomposición de la celulosa mediante la aplicación de una base, como hidróxido de sodio (NaOH), que también descompone los enlaces químicos y produce azúcares más simples.

**MICROCRISTALINA:** Característica de tener cristales de tamaño reducido, en este caso, aplicado a la celulosa obtenida.

**MODIFICACIÓN QUÍMICA:** Proceso en el que se introducen cambios químicos controlados en la celulosa microcristalina para mejorar sus propiedades o facilitar su procesamiento.

**PENNISETUM PURPUREUM:** Especie de pasto también conocida como "pasto elefante" o "pasto de Guinea" utilizado como fuente de celulosa en este proceso.

**PULPA DE CELULOSA:** Material fibroso obtenido después de descomponer la biomasa



lignocelulósica, rico en celulosa.

**RENDIMIENTO:** Cantidad de celulosa microcristalina obtenida en relación con la cantidad de Pennisetum purpureum utilizado en el proceso.

**SOSTENIBILIDAD:** Enfoque que considera la obtención de la celulosa microcristalina de forma ambientalmente amigable, utilizando recursos renovables y minimizando el impacto ambiental.

**SUSPENSIONES ACUOSAS:** Mezcla de partículas de celulosa microcristalina en agua, utilizada en diversas aplicaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALIMENTACIÓN SANA.** *Derivados de la celulosa, Dispersión y solubilización.* [Blog] [Consulta: 10 julio 2021]. Disponible en: <http://www.alimentacion-sana.org/informaciones/Chef/derivados.htm>

**AROCA MERELLYS et al.** Estudio comparativo de la celulosa obtenida a partir del pseudotallo de banano con la obtenida de bagazo de la caña de azúcar, empleando la misma metodología. [En línea] (Trabajo de titulación). (Químico farmacéutico) UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL FACULTAD CIENCIAS QUÍMICAS. Guayaquil-Ecuador. 2015. pp. 20- 23. [Consulta: 10 julio 2021]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/8920/1/BCIEQ-T-0106%20Aroca%20Chica%20Merellys%20Jazmín%20%3b%20Estrada%20Ramírez%20Paúl%20Emilio.pdf>

**ARROYO KARINA et al.** “Biocompósitos de almidón termoplástico con microfibras de celulosa”. . [En línea] (Trabajo de titulación). (Licenciado) Instituto Politecnico Nacional Centro de Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politecnico Nacional Unidad Altamira. Altamira-Mexico. 2008. Pp. 45. [Consulta: 10 julio 2021]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/3812/BIOCOMPOSITOSDEAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**BASTIDAS VANESA.** Envoltura comestible a base de celulosa microcristalina de bagazo de caña de azúcar. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Técnica Del Norte Facultad De Ingeniería En Ciencias Agropecuarias Y Ambientales Carrera De Ingeniería Agroindustrial. Ibarra-Ecuador. 2016. pp. 20- 23. [Consulta: 12 julio 2021]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/5313/1/03%20EIA%20408%20TESIS%20DE%20GRADO.pdf>

**BEMHAJA MARIA.** Pasto elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) INIA Lambaré. *Unidad de agronegocios y difusión del INIA.* [En línea] 2000. (Uruguay) 1(2) pp.56-64. [Consulta: 12 julio 2021]. ISSN 9974-38-112-6. Disponible en: <http://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807160841.pdf>

**BORDALLO LOPEZ et al.** Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar. *ICIDCA. Sobre los derivados de caña de azúcar.* [En línea] 2013 (Cuba). 47 (1) pp. 57-63. [Consulta: 5 agosto

2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223126409008.pdf>

**CACERES O. et al.** Influencia de la edad de cosecha sobre el valor nutritivo y rendimientos de nutrimentos de tres gramíneas forrajeras. *Pastos y forrajes*. [En línea] 1988 1(2) pp. 183-189.

[Consulta: 13 julio 2021] ISSN 2078-8452. Disponible en:

<https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=1371>

**CARCHI DAVID.** Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa. (En línea) (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad De Cuenca Facultad De Ciencias Químicas Escuela De Ingeniería Química. Cuenca-Ecuador 2014. pp. 56.

[Consulta: 15 julio 2021]. Disponible en:

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5292/1/tesis.pdf>

**CAZCO CARMEN.** Obtención y caracterización de carboximetil celulosa (cmc) a partir de los forrajes pasto elefante (*pennisetum sp*) y king grass (*pennisetum hybridum*) para su aplicación en la industria alimentaria. (En línea) (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Nacional De Chimborazo Facultad De Ingeniería Escuela De Ingeniería Agroindustrial. Riobamba-Ecuador 2014. pp. 56. [Consulta: 20 julio 2021]. Disponible en:

<file:///C:/Users/LIZZ/Downloads/UNACH-EC-ING-AGRO-2017-0004.pdf>

**CHAVEZ ALEJANDRA.** *Tintas Ferrogálicas: su composición y principales mecanismos de transformación*. [En línea] Artículos especializados. 2008. 38 [Consulta: 21 agosto 2021].

Disponible en: <https://docplayer.es/92106020-Articulos-especializados-tintas-ferrogalicas-su-composicion-y-principales-mecanismos-de-transformacion-alejandra-odor-chavez.html>

**CUADRADO GABRIELA.** “Diseño de un proceso industrial para la elaboración de mermelada a partir del zapallo (cucurbita maxima) para la asociación asosambay de la parroquia bayushig”. (En línea) (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Nacional De Chimborazo Facultad De Ciencias Escuela De Ingeniería Química. Riobamba-Ecuador 2019. pp. 98-102. [Consulta: 28 julio 2021]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/11059/1/96T00536.pdf>

**DURAND ANAYA et al.** “Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina”. *Tecnología ciencia y educación*. [En línea] 2008. (México) 23 (1) pp. 31-39.

[Consulta: 10 julio 2021]. ISSN 0186-6036. Disponible en:  
<https://www.redalyc.org/pdf/482/48223105.pdf>

**FERRER ANA.** Aprovechamiento integral del residuo de la industria del aceite de palma (EFB). Obtención de derivados de las hemicelulosas, pastas celulósicas y celulosa nanofibrilar. (En línea) (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad De Córdoba Facultad De Ciencias Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química. Córdoba-España. 2013. pp. 235-250. [Consulta: 1 agosto 2021]. Disponible en: <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/10702>

**GONZALES IGNACIO et al.** Producción y composición química de forrajes de dos especies de pasto Elefante (*Pennisetum* sp.) en el Noroccidente de Venezuela. *Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas*. [En línea] 2011 (Venezuela). 29 (1) pp. 29 ISSN: 103-112 [Consulta: 10 agosto 2021]. Disponible en: <http://www.bioline.org.br/pdf?zt11009>

**GONZALES PAULA et al.** Planta de producción de ácido fórmico. (En línea) (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Autonoma de Barcelona. Cerdañola del Valles-España. 2016. pp. 87 [Consulta: 15 agosto 2021]. Disponible en:  
[https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168385/TFG\\_Capsule\\_cap01.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168385/TFG_Capsule_cap01.pdf)

**GONZALES ROBERTO.** Principios básicos de escalados. *Editorial Universitaria, Habana Cuba*. [En línea] 2018 (Cuba). 1 (2) pp. 43 ISBN: 959-16-0112-3 [Consulta: 7 agosto 2021]. Disponible: en:  
[https://www.researchgate.net/publication/325908683\\_Principios\\_Basicos\\_de\\_Escalado](https://www.researchgate.net/publication/325908683_Principios_Basicos_de_Escalado)

**LARISSA S. A. SCHNEIDER ET AL.** “Forage production stability of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) Genotypes in campos dos Goytacazes, RJ, Brazil”. *Agrociencia*. [En línea] 2016. (Brasil) 50(6) pp. 603-700. [Consulta: 10 julio 2021]. ISSN 1405-3195. Disponible en:  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952016000600693](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000600693)

**LOCAN JORGE.** Miradas locales en tiempos globales, intervenciones literarias sobre la ciudad latinoamericana. *Vervuert Verlagsgesellschaft*. [En línea] 2016 (Argentina). 1 (1) pp. 23-96 ISBN- 978-84-8489-970-9 [Consulta: 19 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.iberamericana-vervuert.es/FichaLibro.aspx?P1=116847>

**LOPEZ BOLIO et al.** Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: Obtención y caracterización. *Revista mexicana de ingeniería química*. [En línea] 2011. (Mexico) 10(2) pp.291-299. [Consulta: 12 julio 2021]. ISSN 1665-2738. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000200013](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200013)

**LOPEZ JOSEFINA et al.** Uso De Herramientas Alternativas En El Monitoreo Del Forraje. [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA FACULTAD DE AGRONOMÍA. Montevideo-Uruguay. 2019. pp. 56. [Consulta: 13 julio 2021]. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/29403/1/LópezRodríguezJosefina.pdf>

**MARTINEZ JORGE.** Métodos De Investigación Cualitativa. *Revista Silogismo. Educadores solidarios con el progreso de los colombianos*. [En línea] 2011 (Colombia). 8 (1) pp. 27-38 [Consulta: 22 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.studocu.com/co/document/universidad-el-bosque/medicina-interna/metodos-de-investigacion-cualitativa-martinez/23597329>

**McCABE L. WARREN et al.** Operaciones unitarias en ingeniería química. *Ingeniería química*. [En línea] 2007 (Mexico). 7 (1) pp. 67-80 ISBN-13: 978-970-10-6174-9 [Consulta: 15 agosto 2021]. Disponible en: <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/14698.pdf>

**PINEDA ADRINA et al.** Obtención de celulosa micro cristalina a partir de la fibra de estopa de coco. (En línea) (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad De Guayaquil Facultad De Ingeniería Química Carrera Ingeniería Química. Guayaquil-Ecuador. 2018. pp. 45 [Consulta: 21 agosto 2021]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/18805/1/trabajo%20de%20grado%20cd.pdf>

**REGLAMENTO (CE) No 1333/2008 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO.** *Diario Oficial de la Unión Europea*. [En línea] 2008. [Consulta: 23 julio 2021]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2008/354/L00016-00033.pdf>

**RODRIGUEZ ITZIAR.** Pretratamiento de hidrólisis hidrotérmica para la degradación de los carbohidratos complejos de residuos de frutas para la obtención de bioetanol. (En línea) (Trabajo de titulación). (Masterado) Universidad De Oviedo Master Universitario En Biotecnología Alimentaria

Obviedo-España. 2016. pp. 78 [Consulta: 22 agosto 2021]. Disponible en: [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/39252/TFM\\_ItziarRodriguezValiente.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/39252/TFM_ItziarRodriguezValiente.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

**ROMERO P. et al.** Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar. *ICIDCA : Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar.* . [En línea] 2013 (Colombia). 47 (1) pp. 57-63. ISSN 1025-3076. [Consulta: 25 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223126409008.pdf>

**RUIZ ANGELA et al.** “Escalamiento de Procesos Químicos y Bioquímicos basado en un Modelo Fenomenológico”. *Información tecnológica.* [En línea] 2011. (Colombia) 22 (6) pp.65. doi: 10.4067/S0718-07642011000600005 [Consulta: 10 julio 2021]. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v22n6/art05.pdf>

**SEGURA FREIMAR.** Delignificación selectiva del pasto pennisetum purpureum x pennisetum typhoides usando basidiomicetos ligninolíticos. *Vitae.* [En línea] 2008. 15 (1) pp. 57-63. ISSN 0121-4004. [Consulta: 26 agosto 2021]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-40042008000100006&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-40042008000100006&script=sci_abstract&tlng=es)

**UCUBARRI C. et al.** Extracción y precipitación de las proteínas solubles del pasto elefante enano (*Pennisetum purpureum* Schum cv. Mott). *Revista de la facultad de agronomía.* [En línea] 2004. (Venezuela) 21 (3) pp. 268-279 . ISSN 0378-7818. [Consulta: 27 agosto 2021]. Disponible en: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-78182004000300006](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182004000300006)

**VALDIVIESO JUAN.** DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE PAPEL A PARTIR DE LA CELULOSA EXTRAÍDA DEL OLOTE DE MAÍZ (*Zea mays* L. Var. Ceratina). (En línea) (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica De Chimborazo Facultad De Ciencias Carrera De Ingeniería Química. Riobamba-Ecuador. 2020. pp. 120-125 [Consulta: 30 agosto 2021]. Disponible en: <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/13964/3/96T00575.pdf>

**VAN CLEEF et al.** Chemical composition and fermentation characteristics of elephant grass silage with biodiesel industry co-products. [En línea] 2012. (Brasi) 42 (4) pp. 718-723 . ISSN 0103-8478 [Consulta: 1 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33122470024>

## ANEXOS

### ANEXO A: Resultados de los residuales del análisis de la varianza del análisis de los datos pureza y rendimiento de celulosa microcristalina en RStudio.

Resultados de los residuales del análisis de la varianza del análisis de los datos pureza de celulosa enRStudio.

```
> Summary(Pureza) Tratamientos      Pureza (%)
Length:18      Min. :42.15 Class :character 1st Qu.:52.95 Mode
:character      Median :67.73
                Mean :62.673rd Qu.:70.65Max. :75.63
```

```
> aov(`Pureza (%)`~Tratamientos)Call:
```

```
aov(formula = `Pureza (%)` ~ Tratamientos)
```

Terms:

	Tratamientos	Residuals
Sum of Squares	2127.5646	45.4131
Deg. of Freedom	5	12

Residual standard error: 1.945361 Estimated effects may be unbalanced

Resultados de los residuales del análisis de la varianza del análisis de los datos de rendimiento de celulosa microcristalina obtenida en RStudio.

```
> Summary(Rendimiento)
```

```
Tratamientos      Rendimiento (%)
Length:18      Min. :20.60
Class :character 1st Qu.:29.96 Mode :character      Median
:34.85          Mean :32.85 3rd Qu.:36.83Max. :39.46
```

```
> aov(`Rendimiento (%)`~Tratamientos)Call:
```

```
aov(formula = `Rendimiento (%)` ~ Tratamientos)
```

Terms:

	Tratamientos	Residuals
Sum of Squares	514.0296	36.8942
Deg. of Freedom	5	12

Residual standard error: 1.75343 Estimated effects may be unbalanced

**ANEXO B:** Ensayo de laboratorio



Selección del *Pennisetum Purpureum*.  
**Fuente:** Briones, Javier 2021



Secado del *Pennisetum Purpureum*.  
**Fuente:** Briones, Javier 2021



*Pennisetum Purpureum* seco molido.  
**Fuente:** Briones, Javier 2021





Extracción de extraíbles del *Pennisetum Purpureum*.

**Fuente:** Briones, Javier 2021



Secado del *Pennisetum Purpureum* luego de la extracción de extraíbles.

**Fuente:** Briones, Javier 2021



Hidrolisis ácida del *Pennisetum Purpureum*

**Fuente:** Briones, Javier 2021



Hidrolisis alcalina de la pulpa de celulosa.

Fuente: Briones, Javier 2021



Blanqueo de la pulpa de celulosa.

Fuente: Briones, Javier 2021



Celulosa microcristalina seca  
molida

Fuente: Briones, Javier 2021







epoch

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 07 / 2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> <i>Javier Ignacio Briones García</i>
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>
<b>Título a optar:</b> <i>Magíster en Ingeniería Química Aplicada</i>
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.



Firmado electrónicamente por:  
LUIS ALBERTO  
CAMINOS VARGAS



0035-DBRA-UTP-IPEC-2023