



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO DE UN PROCESO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN
DE AZÚCARES FERMENTABLES A PARTIR DE ASERRÍN DE
MADERA DE CIPRÉS (*Cupressus lusitánica miller*) MEDIANTE
HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: JUAN OMAR MEDINA CAICEDO

DIRECTOR: Ing. MARCO RAUL CHUIZA ROJAS, Mgs.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, **Juan Omar Medina Caicedo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos por cualquier medio o procedimientos, incluyendo las citas bibliográficas del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Juan Omar Medina Caicedo, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos 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 integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 12 de junio de 2023



Juan Omar Medina Caicedo

0502951155

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular: Tipo Proyecto Técnico, **DISEÑO DE UN PROCESO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES A PARTIR DE ASERRÍN DE MADERA DE CIPRÉS (*Cupressus lusitánica miller*) MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA**, realizado por el señor: **JUAN OMAR MEDINA CAICEDO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Cristina Alejandra Muñoz Shuguli PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-06-12
Mgs. Marco Raul Chuiza Rojas DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-06-12
MgC. Linda Mariuxi Flores Fiallos ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-06-12

DEDICATORIA

El presente trabajo de integración curricular está dedicado a mis papás (María y Pablo) y a mis hermanos, quienes con mucho esfuerzo, amor, paciencia y sabiduría han sabido guiarme por el camino del bien, todos los días, durante toda mi vida.

Juan

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por darme la oportunidad de obtener una profesión y ser una ayuda para la sociedad.

A todos los docentes y técnicos docentes de la Facultad de Ciencias que compartieron sus conocimientos con paciencia y afecto.

Juan

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRAC	xviii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1. Identificación del problema	2
1.2. Justificación del proyecto.....	3
1.3. Beneficiarios directos e indirectos	4
<i>1.3.1. Beneficiarios directos</i>	<i>4</i>
<i>1.3.2. Beneficiarios indirectos</i>	<i>4</i>
1.4. Objetivos.....	4
<i>1.4.1. Objetivo general</i>	<i>4</i>
<i>1.4.2. Objetivos específicos</i>	<i>4</i>
1.5. Localización del proyecto.....	5

CAPITULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1. Ciprés (Cupressus lusitanica Miller)	6
<i>2.1.1. Composición.....</i>	<i>6</i>
<i>2.1.2. Producción</i>	<i>6</i>
<i>2.1.3. Usos</i>	<i>7</i>
2.2. Proceso de obtención de azúcares fermentables	7

2.2.1. Molienda	7
2.2.2. Tamizado	8
2.2.3. Pretratamiento de la materia lignocelulósica	8
2.2.3.1. Trituración mecánica	9
2.2.3.2. Pretratamiento ácido	9
2.2.3.3. Pretratamiento alcalino	10
2.2.3.4. Explosión de vapor	10
2.2.4. Hidrólisis enzimática	10
2.2.4.1. Hidrólisis enzimática de la celulosa	12
2.2.5. Usos de los azúcares fermentables	13
2.2.5.1. Producción de bebidas alcohólicas	13
2.2.5.2. Producción de alimentos	13
2.2.5.3. Producción de productos químicos	13
2.2.5.4. Generación de energía	13
2.2.5.5. Tratamiento de residuos	14
2.2.6. Composición de los azúcares fermentables	14

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO	15
3.1. Tipo de estudio	15
3.2. Métodos	15
3.2.1. <i>Método deductivo</i>	15
3.2.2. <i>Método experimental</i>	15
3.2.3. <i>Método inductivo</i>	15
3.3. Parte experimental	16
3.3.1. Obtención de los azúcares fermentables	16
3.3.1.1. <i>Recolección del aserrín</i>	16
3.3.1.2. <i>Secado del aserrín</i>	16
3.3.1.3. <i>Molienda del aserrín</i>	16
3.3.1.4. <i>Tamizado del aserrín</i>	16
3.3.1.5. <i>Caracterización del aserrín</i>	17
3.3.1.6. <i>Pretratamiento del aserrín</i>	21
3.3.1.7. <i>Hidrólisis del aserrín</i>	22
3.3.1.8. <i>Caracterización de los azúcares fermentables</i>	23

3.3.1.9.	<i>Diagrama del proceso de obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín</i>	27
3.4.	VARIABLES DEL PROCESO	28
3.5.	DATOS EXPERIMENTALES	29
3.5.1.	En la caracterización del aserrín	29
3.5.1.1.	<i>Humedad del aserrín</i>	29
3.5.1.2.	<i>Cenizas totales</i>	29
3.5.1.3.	<i>Lignina insoluble en ácido</i>	30
3.5.1.4.	<i>Celulosa en aserrín</i>	30
3.5.2.	En el pretratamiento del aserrín	31
3.5.2.1.	<i>Pretratamiento ácido del aserrín</i>	31
3.5.3.	En el tratamiento enzimático del aserrín	31
3.5.3.1.	<i>Hidrólisis enzimática del aserrín</i>	31
3.5.3.2.	<i>En el filtrado</i>	31
3.5.3.3.	<i>Cálculo del porcentaje de sólidos retenidos</i>	32
3.5.4.	En la caracterización de los azúcares fermentables	32
3.5.4.1.	<i>Sólidos totales</i>	32
3.5.4.2.	<i>Cenizas totales</i>	33
3.5.4.3.	<i>pH de los azúcares fermentables</i>	34
3.5.4.4.	<i>Densidad</i>	34
3.5.4.5.	<i>Índice de refracción, Brix y temperatura</i>	35
3.6.	BALANCE DE MATERIA	35
3.6.1.	En la molienda	35
3.6.2.	En el tamizado	36
3.6.3.	En el pretratamiento	36
3.6.4.	En la hidrólisis	37
3.6.5.	Rendimiento global del proceso de obtención de azúcares fermentables	37
3.7.	DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS	38
3.7.1.	Diseño del recipiente de recepción	38
3.7.1.1.	<i>Cantidad de aserrín de ciprés a utilizar para la producción de un aserradero</i>	38
3.7.1.2.	<i>Volumen a ocupar por el aserrín</i>	38
3.7.1.3.	<i>Volumen total del recipiente</i>	38
3.7.2.	Diseño del molino de aserrín	38
3.7.2.1.	<i>Cantidad estimada de aserrín obtenido por la molienda</i>	39
3.7.3.	Diseño del tamiz de aserrín	39
3.7.4.	Diseño de un equipo de pretratamiento	40
3.7.4.1.	<i>Volumen total del reactor para el pretratamiento</i>	40
3.7.4.2.	<i>Diámetro del reactor para el pretratamiento</i>	40

3.7.4.3.	<i>Diámetro total del reactor para el pretratamiento</i>	41
3.7.4.4.	<i>Altura del reactor para el pretratamiento</i>	41
3.7.4.5.	<i>Altura total del reactor para el pretratamiento</i>	41
3.7.4.6.	<i>Volumen total del reactor de pretratamiento</i>	41
3.7.4.7.	<i>Dimensionamiento de las partes del sistema de agitación del reactor</i>	42
3.7.4.8.	<i>Cálculo del número de Reynolds del pretratamiento</i>	43
3.7.4.9.	<i>Cálculo de la potencia que necesita el sistema de agitación</i>	43
3.7.4.10.	<i>Potencia real necesaria para el sistema de agitación del reactor del pretratamiento</i>	44
3.7.4.11.	<i>Tiempo de agitación en el reactor de pretratamiento</i>	44
3.7.4.12.	<i>Sistema de calentamiento</i>	44
3.7.5.	<i>Diseño de un equipo para la hidrólisis enzimática</i>	46
3.7.5.1.	<i>Volumen total del biorreactor para la hidrólisis</i>	46
3.7.5.2.	<i>Diámetro del biorreactor para la hidrólisis</i>	46
3.7.5.3.	<i>Diámetro total del biorreactor para la hidrólisis</i>	46
3.7.5.4.	<i>Altura del biorreactor para la hidrólisis</i>	47
3.7.5.5.	<i>Altura total del biorreactor para la hidrólisis</i>	47
3.7.5.6.	<i>Volumen total del biorreactor para la hidrólisis</i>	47
3.7.5.7.	<i>Dimensionamiento de las partes del sistema de agitación del biorreactor</i>	47
3.7.5.8.	<i>Cálculo del número de Reynolds del biorreactor para la hidrólisis</i>	48
3.7.5.9.	<i>Cálculo de la potencia que necesita el sistema de agitación</i>	49
3.7.5.10.	<i>Potencia real necesaria para el sistema de agitación en el biorreactor</i>	50
3.7.5.11.	<i>Tiempo de agitación en el biorreactor</i>	50
3.7.5.12.	<i>Sistema de calentamiento</i>	50
3.7.5.13.	<i>Cantidad estimada de azúcares fermentables después de la hidrólisis</i>	52
3.8.	<i>Equipos adicionales</i>	52
3.8.1.	<i>Báscula de suelo</i>	52
3.8.2.	<i>Refractómetro</i>	52
3.8.3.	<i>pHmetro</i>	53
3.9.	<i>Análisis costo-beneficio</i>	53
3.9.1.	<i>Costos variables</i>	53
3.9.2.	<i>Costos fijos</i>	54
3.9.3.	<i>Precio de producción de los azúcares fermentables</i>	54
3.9.4.	<i>Precio de venta de los azúcares fermentables</i>	54
3.9.5.	<i>Punto de equilibrio mensual y anual</i>	55
3.9.6.	<i>Maquinarias y equipos</i>	55
3.9.7.	<i>Proyección de ventas y su presupuesto</i>	56
3.9.8.	<i>Proyección de costo y su presupuesto</i>	56

3.9.9.	<i>Flujo de caja</i>	57
--------	----------------------------	----

CAPITULO IV

4.	RESULTADOS	58
4.1.	Resultados	58
4.1.1.	<i>Caracterización de la materia prima</i>	58
4.1.2.	<i>Caracterización de los azúcares fermentables</i>	58
4.1.3.	<i>Rendimiento de los procesos en laboratorio</i>	58
4.1.4.	<i>Dimensionamiento de los equipos</i>	59
4.2.	Análisis y discusión de resultados	61

	CONCLUSIONES	63
--	---------------------------	----

	RECOMENDACIONES	64
--	------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Datos de ubicación de la Facultad de Ciencias ESPOCH	5
Tabla 1-2: Ventajas y desventajas de varios procesos de pretratamiento para materiales lignocelulósicos	8
Tabla 2-2: Composición de los azúcares fermentables	14
Tabla 1-3: Determinación de humedad del aserrín	17
Tabla 2-3: Determinación de cenizas totales del aserrín.....	18
Tabla 3-3: Determinación de la lignina por el método de Klason	18
Tabla 4-3: Determinación de la celulosa en el aserrín	19
Tabla 5-3: Pretratamiento del aserrín.....	21
Tabla 6-3: Hidrólisis enzimática del aserrín	22
Tabla 7-3: Determinación de sólidos totales de los azúcares fermentables	24
Tabla 8-3: Determinación de cenizas totales de los azúcares fermentables.....	24
Tabla 9-3: Determinación de pH de los azúcares fermentables	25
Tabla 10-3: Determinación de la densidad de los azúcares fermentables	26
Tabla 11-3: Determinación de índice de refracción, °Brix y temperatura	26
Tabla 12-3: Variables del proceso de obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín..	28
Tabla 13-3: Datos experimentales de la humedad en el aserrín.....	29
Tabla 14-3: Datos experimentales de cenizas totales en el aserrín	29
Tabla 15-3: Contenido de cenizas totales del aserrín.....	29
Tabla 16-3: Datos experimentales de lignina insoluble en ácido.....	30
Tabla 17-3: Contenido de lignina insoluble del aserrín	30
Tabla 18-3: Datos experimentales de contenido de celulosa en aserrín.....	30
Tabla 19-3: Contenido de celulosa en aserrín	31
Tabla 20-3: Datos experimentales del pretratamiento ácido.....	31
Tabla 21-3: Datos experimentales de la hidrólisis enzimática.....	31
Tabla 22-3: Datos experimentales en la filtración	31
Tabla 23-3: Datos experimentales de los sólidos totales en los azúcares fermentables.....	32
Tabla 24-3: Contenido de sólidos totales en el jugo de caña	33
Tabla 25-3: Datos experimentales de cenizas totales en los azúcares fermentables	33
Tabla 26-3: Contenido de cenizas totales de los azúcares fermentables.....	33
Tabla 27-3: Datos experimentales del pH de los azúcares fermentables	34
Tabla 28-3: Datos experimentales de la densidad de los azúcares fermentables	34
Tabla 29-3: Densidad de los azúcares fermentables	34
Tabla 30-3: Datos experimentales índice de refracción, Brix y temperatura.....	35
Tabla 31-3: Características de un molino de aserrín.....	38

Tabla 32-3: Características de un tamiz lineal para el aserrín.....	39
Tabla 33-3: Igualdades para un sistema de agitación estándar para un reactor	42
Tabla 34-3: Dimensiones de las partes del reactor con su sistema de agitación.....	42
Tabla 35-3: Igualdades para un sistema de agitación estándar para un biorreactor	47
Tabla 36-3: Dimensiones de las partes del reactor con su sistema de agitación.....	48
Tabla 37-3: Características de báscula de suelo recomendada	52
Tabla 38-3: Características del refractómetro recomendado.....	52
Tabla 39-3: Características del pHmetro recomendado	53
Tabla 40-3: Costo de aditivos, materia prima e insumos para producir 4000L de azúcares fermentables	53
Tabla 41-3: Costos variables de producción al mes.....	54
Tabla 42-3: Otros costos variables a tener en cuenta.....	54
Tabla 43-3: Costos fijos del proceso de producción al mes.....	54
Tabla 44-3: Punto de equilibrio mensual y anual.....	55
Tabla 45-3: Costos, depreciación, mantenimiento y seguro de maquinarias y equipos.....	55
Tabla 46-3: Proyección de ventas y su presupuesto.....	56
Tabla 47-3: Proyección de costos y su presupuesto.....	56
Tabla 48-3: Flujo de caja	57
Tabla 1-4: Resultados de la caracterización de la materia prima (Aserrín)	58
Tabla 2-4: Resultados de la caracterización de los azúcares fermentables	58
Tabla 3-4: Resultados de los procesos en laboratorio	58
Tabla 4-4: Resultado del dimensionamiento de los equipos	59
Tabla 5-4: Resultado del análisis costo-beneficio.....	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Georreferencia de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.....	5
Ilustración 1-2: Componentes de <i>C. lusitánica</i>	6
Ilustración 2-2: Principales productos que se producen durante la hidrólisis de materiales lignocelulósicos	11
Ilustración 2-3: Modo de acción de las enzimas celulolíticas	13
Ilustración 1-3: Diagrama del proceso de recolección, molienda y tamizado.....	17
Ilustración 2-3: Diagrama del proceso de pretratamiento ácido.....	22
Ilustración 3-3: Diagrama del proceso de hidrólisis enzimática.....	23
Ilustración 4-3: Diagrama del proceso de obtención de azúcares fermentables.....	27
Ilustración 1-3: Diseño del reactor con sus respectivas partes	42
Ilustración 2-3: Número de Reynolds vs Número de potencia para tipos de agitadores tipo turbina	43
Ilustración 3-3: Diseño del biorreactor con sus respectivas partes.....	48
Ilustración 2-3: Número de Reynolds vs Número de potencia para tipos de agitadores tipo turbina	49

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: CARACTERIZACIÓN DEL ASERRÍN

ANEXO B: ELABORACIÓN DE LOS AZÚCARES FERMENTABLES

ANEXO C: CARACTERIZACIÓN DE LOS AZÚCARES FERMENTABLES

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
UFC	Unidad formadora de colonias
EG	Endo-1,4- β -D-glucanasa
CBH	1,4- β -D-glucan celobiohidrolasa
BGL	β -glucosidasas
D_{TF}	Diámetro del reactor
D_{AF}	Diámetro del agitador
H_F	Altura que ocupa el liquido
R_F	Longitud entre la pared del reactor y los deflectores
E_F	Longitud que separa el fondo del reactor hasta el rodete
W_F	Ancho de las aspas de la turbina
B_F	Ancho de la placa deflectora
Re	Número de Reynolds
N_P	Número de potencia
PF_{real}	Potencia real necesaria
t_a	Tiempo de agitación en el reactor
D_C	Diámetro de la chaqueta de calentamiento
E_C	Espesor de la chaqueta de calentamiento
H_c	Altura de la chaqueta de calentamiento
V_C	Volumen de la chaqueta de calentamiento
Q_{CH}	Calor necesario en la chaqueta de calentamiento

RESUMEN

El presente trabajo se lo realizó con el objetivo de diseñar un proceso industrial para la obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín de madera de ciprés (*Cupressus lusitánica miller*). El proceso está constituido por molienda, tamizado, un tratamiento previo e hidrólisis. El proyecto se lo trabajó en la ESPOCH ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, el proceso de recolección de aserrín se lo realizo en los aserraderos de la parte norte de la ciudad de Riobamba. La caracterización de la composición de materia prima se realizó a través de las técnicas de laboratorio de investigación, teniendo características como 19,80% de humedad; 0,795% de cenizas; 20,5228% de lignina de Klason y 43,25% de celulosa. El producto obtenido tuvo 10,2° Brics, medido en laboratorio con el refractómetro. Además, en el dimensionamiento de los equipos se estimó las cantidades a procesar con un rendimiento global de 68,26%. Se concluyo, por medio del análisis costo beneficio, que el proyecto es viable con un tiempo de recuperación de siete años y dos meses, siendo el costo de producción de 0,61 dólares por litro de azúcares fermentables. Se recomienda que se extienda el estudio para que el proceso sea más eficiente y parte de una economía circular, de modo que los desechos sean aprovechados para generar un beneficio económico y un compromiso ambiental.

Palabras clave: <CIPRÉS (*Cupressus lusitánica miller*)>, <AZÚCARES FERMENTABLES>, <MOLIENDA>, <TAMIZADO>, <HIDRÓLISIS>.

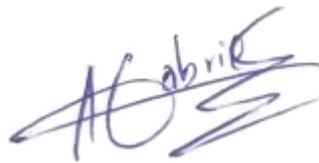
1368-DBRA-UPT-2023



ABSTRAC

The present work was carried out with the objective of designing an industrial process for obtaining fermentable sugars from cypress wood sawdust (*Cupressus lusitanica miller*). The process consists of milling, screening, pretreatment and hydrolysis. The project was carried out at the ESPOCH in the city of Riobamba, province of Chimborazo; the sawdust collection process was performed in sawmills in the northern part of the city of Riobamba. The characterization of the raw material composition was conducted through laboratory research techniques, having characteristics such as 19.80% humidity; 0.795% ash; 20.5228% Klason lignin and 43.25% cellulose. The product obtained had 10.2° Brix, measured in the laboratory with the refractometer. Moreover, in the sizing of the equipment, the quantities to be processed were estimated with an overall yield of 68.26%. It was concluded, by means of the cost-benefit analysis, that the project is feasible with a recovery time of seven years and two months, with a production cost of US\$0.61 per liter of fermentable sugars. It is recommended that the study be extended to make the process more efficient and part of a circular economy, so that waste is used to generate an economic benefit and an environmental commitment.

Key words: <CIPRES (*Cupressus lusitánica miller*)>, <FERMENTABLE SUGARS>, <GRINDING>, <SCREENING>, <HIDROLYSIS>.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ana Gabriela Reinoso'.

Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un conflicto de intereses en biorecursos entre la producción de alimentos y la producción de productos industriales. Por esta razón se trata de usar desechos como materia prima para la producción de productos industriales.

Debido a que en Ecuador se aprovecha en poca medida los desechos producidos por el sector maderero, estos pueden tener un gran uso en el sector industrial como materia prima en la producción de azúcares fermentables. Estos productos fermentables se pueden usar en la producción de biogás, bioetanol y otros productos que son ampliamente utilizados en el sector industrial.

En el presente proyecto sea propuesto diseñar un proceso industrial para la obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín de ciprés (*Cupressus lusitánica miller*), que es una materia prima fácil de adquirir. El tipo de hidrólisis es la enzimática puesto que es la más recomendable al momento de hidrolizar materia lignocelulósica, la enzima a usar proviene del hongo *Trichoderma reesei* que es utilizado en el sector agrícola como agente de biocontrol contra hongos fitopatógenos.

El proceso de obtención de azúcares fermentables debe ser cuidadoso en la hidrólisis pues de éste depende el rendimiento de los azúcares fermentables. Otro proceso que puede ayudar a mejorar el rendimiento es el pretratamiento ácido porque elimina la mayoría de lignina, hemicelulosa y otros contaminantes que menoran la producción de azúcares fermentables. Los grados Brix dependen, de los procesos de pretratamiento e hidrólisis enzimática, por lo cual su diseño viene siendo una parte muy importante para el rendimiento del proceso general.

De tal manera, el presente trabajo de investigación está compuesto por cuatro capítulos que permiten dar solución a la problemática de los desechos madereros. En el primer capítulo se presenta de forma detallada el problema, junto a los objetivos que se espera cumplir en el proyecto. El segundo capítulo se encuentra la investigación bibliográfica que sustenta el trabajo expuesto. En el tercer capítulo está el desarrollo de la parte experimental y la realización de los cálculos de ingeniería y en el cuarto capítulo están los resultados junto a los respectivos análisis.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

Los recursos naturales han constituido las principales fuentes para el desarrollo económico de cualquier país. Entre los recursos naturales podemos encontrar los residuos forestales constituidos por restos de aserraderos y de ebanisterías. El aserrín es uno de los principales residuos forestales y su acumulación puede tener efectos ambientales negativos (Serret-Guasch Nurian, Giralto-Ortega Giselle y Quintero-Ríos Mairet 2016).

En el Ecuador la silvicultura, es decir, el sector forestal y su industria maderera, ha tenido un crecimiento sostenido durante los últimos años debido a la presencia de importantes recursos forestales de rápido y mediano crecimiento. En el Ecuador se registró 180.000 ha de plantaciones forestales comerciales en 2019, lo que equivale a una masa aproximada de 180 millones de árboles plantados. El 65% de las plantaciones forestales comerciales estuvieron en Cotopaxi, Los Ríos, Guayas, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas, además, 160.000 ha del total fueron cultivadas con pino, teca, eucalipto, melina, balsa y ciprés; esto según el Ministerio de Agricultura – MAG (Sánchez et al. 2020).

Los residuos generados por la industria maderera tienen un impacto negativo en la salud de las personas que se ven expuestas al polvo de aserrín, así como a los gases generados por la combustión de estos (Hancock et al. 2015).

Los cánceres de pulmón ocupacionales representan aproximadamente el 75 % de todos los cánceres ocupacionales con tasas de supervivencia de 5 años relativamente bajas en comparación con la mayoría de los otros tipos de cáncer (Hancock et al. 2015).

La exposición ocupacional a restos de polvo de madera es extremadamente común en una amplia gama de trabajos, a pesar de los avances en seguridad y salud en el trabajo. El polvo de madera se confirmó como grupo carcinógeno número 1 en humanos en 1995 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC). Sin embargo, el polvo de madera solo se ha relacionado de manera concluyente con cánceres sinonasales, a pesar de los estudios individuales que sugieren una asociación con una gama de enfermedades respiratorias y cánceres del tracto digestivo (Hancock et al. 2015).

1.2. Justificación del proyecto

Se intenta que a través de este trabajo los propietarios de aserraderos y ebanisterías tengan a su disposición, un método novedoso, como lo es el aprovechamiento del aserrín en la obtención de azúcares fermentables mediante hidrólisis enzimática para su posterior uso en las diferentes industrias.

El bioetanol es por mucho el biocombustible más usado a nivel mundial. La producción de bioetanol a partir de biomasa es una manera de reducir el consumo de petróleo, así como la contaminación ambiental. El bioetanol se puede producir desde diferentes tipos de materias primas. Estas materias primas de agricultura se clasifican en tres categorías: azúcares simples, almidón y material lignocelulósico. La biomasa lignocelulósica es la materia prima más prometedora considerando su gran disponibilidad y bajo costo (Balat 2011).

Es por esto que el presente trabajo utiliza el aserrín para obtener azúcares fermentables y que posteriormente éstas puedan ser usadas para la producción de alcohol. Esta nueva fuente de obtención de azúcares fermentables ayudará a contrarrestar los daños ambientales y humanos causados por el polvo del aserrín y por los gases que producen su quema. Sin embargo, el limitante para la producción de etanol a partir de aserrín es la recuperación de los azúcares que contiene y ésta a su vez está determinada por el procedimiento de hidrólisis que se utilice (ácido, básico o enzimático). El procedimiento enzimático está limitado por la presencia de lignina y la cristalinidad de la celulosa, por ello se han venido utilizando diversos procedimientos de pretratamiento, entre los que podemos encontrar el alcalino, el ácido y la explosión con vapor.

Con el propósito de aprovechar un recurso que en la actualidad es un desecho generado constantemente por los aserraderos, se plantea una propuesta que resuelva esta problemática. Usando este residuo como materia prima para la obtención de azúcares fermentables. La materia prima proviene de diferentes aserraderos de la ciudad de Riobamba donde trabajan con maderas suaves. Las maderas son usadas en la construcción de muebles o como andamios por su mayor resistencia, esto gracias a su alto contenido de lignina.

1.3. Beneficiarios directos e indirectos

1.3.1. Beneficiarios directos

- Los propietarios de los aserraderos y ebanisterías de la ciudad de Riobamba ya que contarán con una nueva opción con la que podrán tener un beneficio económico con los residuos que generan.

1.3.2. Beneficiarios indirectos

- Los habitantes que se encuentran cerca de los aserraderos o ebanisterías puesto que no serán afectados por la contaminación provocada por la quema del aserrín.
- Los trabajadores de los aserraderos y ebanisterías pueden ver un aumento en su salario gracias a esta nueva fuente de ingreso para su laburo.
- Así mismo los trabajadores de aserraderos y ebanisterías tendrán un ambiente menos contaminado ya que los residuos deben ser almacenados y por ende no contaminaran en gran medida su puesto de trabajo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar un proceso industrial para la obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín de madera de ciprés (*Cupressus lusitánica miller*) mediante hidrólisis enzimática.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar un pretratamiento a la materia prima con ácido sulfúrico para un óptimo rendimiento en la obtención de azúcares fermentables.
- Realizar pruebas a nivel de laboratorio para establecer las variables del proceso óptimo para la producción de azúcares fermentables.
- Caracterizar los azúcares fermentables obtenidos mediante la hidrólisis enzimática del aserrín.

1.5. Localización del proyecto.

La parte experimental del presente proyecto técnico se desarrollará en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH

Tabla 1-1: Datos de ubicación de la Facultad de Ciencias ESPOCH

Parámetros	Valores
Latitud	1°66'S
Longitud	78°68'W
Altitud	2816 msnm
Clima	Temperatura promedio 12°C

Fuente: Google Earth, 2022

Realizado por: Juan, Medina, 2022.

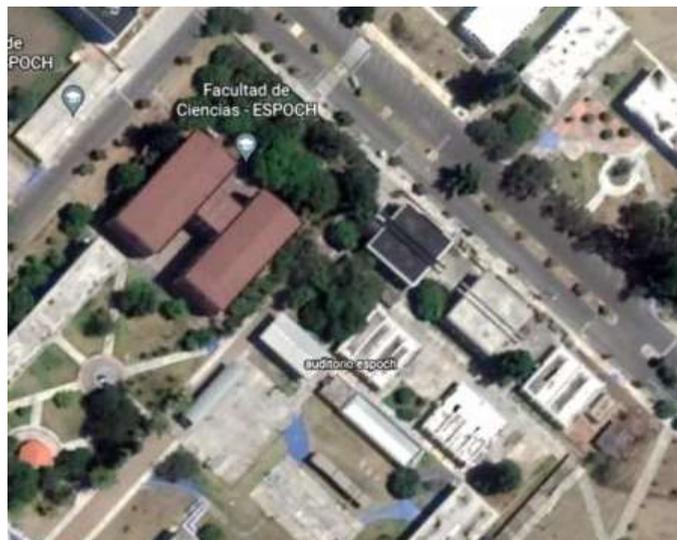


Ilustración 1-1: Georreferencia de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH

Fuente: Google Earth, 2022.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Ciprés (*Cupressus lusitanica* Miller)

Cupressus lusitanica Miller es una conífera nativa de México, y distribuida por toda centroamérica y en zonas montañosas desde los 1200 a 3000 m de altura. Es una especie de rápido crecimiento que produce una madera de gran calidad y soporta un gran rango de condiciones climáticas. Como resultado ha sido ampliamente distribuida ya sea como árbol ornamental o para la producción de madera (Watt et al. 2009).

2.1.1. Composición

Según (de Almeida et al. 2016) la composición química de *C. lusitanica* tiene un 59.19% de holocelulosa (celulosa y hemicelulosa), 36.21% de lignina, 4.08% de contenido extraíble y 0.51% de cenizas.

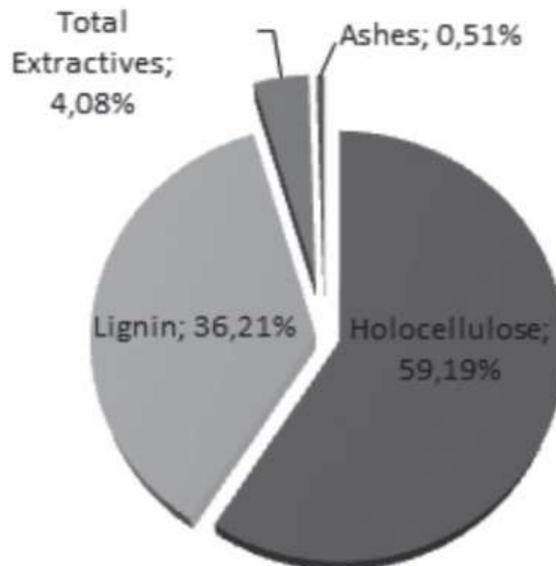


Ilustración 1-2: Componentes de *C. lusitánica*

Fuente: de Almeida et al. 2016

2.1.2. Producción

La producción a escala comercial se originó en los Estados Unidos en 1840. La silvicultura del árbol *C. lusitánica* está muy desarrollada en los países de clima templado; sin embargo, existen experiencias en países tropicales como México, Costa Rica y Colombia en los cuales se producen

árboles de buena calidad en periodos cortos (2 a 3 años) (Petit-Aldana, Uribe-Valle y Muchacho-Briceño 2010).

2.1.3. Usos

Desde tiempos remotos, los bosques de ciprés han sido habitados y utilizados en forma creciente. Hasta la llegada de la colonización europea, a finales del siglo XIII, el uso del bosque por parte de los pobladores se restringía a la recolección de alimentos, medicina, leña, tinturas, etc. Posteriormente, el uso del bosque se centró en los productos forestales no maderable, que son todos aquellos productos de origen vegetal de los bosques naturales, excluida la madera, la leña y el carbón, que son extraídos para el uso humano (Ladio 2022).

Últimamente el cultivo de *Cupressus lusitánica* Miller es más extenso en las zonas altas de la región centroamericana; principalmente para la producción de madera, como cortina rompevientos en cultivos agrícolas, protección del ganado, para la producción de árboles de navidad y como planta ornamental. Las razones para su uso generalizado son: fácil producción de plántulas, el rápido crecimiento inicial, la capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales, la diversidad de usos y la calidad de la madera (Chaves y Fonseca 1991).

2.2. Proceso de obtención de azúcares fermentables

Los residuos lignocelulósicos pueden ser usados en la obtención de azúcares fermentables y más aún si en un futuro se desea reemplazar a los combustibles fósiles con alternativas renovables y sostenibles. El etanol es el biocombustible más usado a nivel mundial y la posibilidad de su producción vía biológica es atractiva gracias a la gran cantidad de residuos lignocelulósicos que están disponibles (Margeot et al. 2009).

El proceso convencional para la producción de azúcares fermentables a partir de biomasa lignocelulósica incluye los siguientes pasos:

- Molienda: Aumenta el área superficial.
- Tamizado: Separa según el tamaño de partícula.
- Pretratamiento: rompe la estructura de la matriz lignocelulósica.
- Hidrólisis enzimática: despolimeriza la celulosa a glucosa con la ayuda de enzimas celulolíticas.

2.2.1. Molienda

El objetivo de este proceso es aumentar el área superficial de las partículas de aserien para que los posteriores pretratamiento y tratamientos tengan una mayor eficiencia. Las enzimas tienen más facilidad para hidrolizar la celulosa.

2.2.2. Tamizado

El tamizado ayuda a la caracterización de la materia prima con el análisis granulométrico, esto ayuda a conocer el tamaño de partícula más abundante que se produce después de la molienda.

2.2.3. Pretratamiento de la materia lignocelulósica

El pretratamiento de la biomasa lignocelulósica tiene como objetivo hacer que la celulosa sea accesible a la acción de la enzima alterando la pared celular lignocelulósica. Los efectos del pretratamiento incluyen: un aumento del área superficial accesible, descristalización de la celulosa, despolimerización parcial de la celulosa, hemicelulosa y/o solubilización de la lignina y la modificación de la estructura de la lignina (Espinosa Negrín et al. 2021).

La hidrólisis sin pretratamiento previo produce normalmente un 20%, mientras que los rendimientos después del pretratamiento a menudo superan 90%, por lo tanto, la necesidad de pretratamiento de cualquier materia prima lignocelulósica para la producción de bioetanol no puede ser exagerado (Akhabue et al. 2019).

Tabla 1-2: Ventajas y desventajas de varios procesos de pretratamiento para materiales lignocelulósicos

Pretratamiento	Ventajas	Limitaciones y desventajas
Trituración mecánica	Reduce la cristalinidad de la celulosa.	El consumo de energía generalmente es más alto que la energía de la biomasa inherente.
Explosión de vapor	Provoca la degradación de la hemicelulosa.	Destruye una porción de la fracción de xilano; ruptura incompleta de la matriz de lignina-carbohidrato; genera compuestos inhibidores de microorganismos.
AFEX(Ammonia fiber explosion)	Aumenta la superficie accesible, elimina hasta cierto punto la lignina y la hemicelulosa; no produce inhibidores para los procesos posteriores.	No tiene ningún efecto para la biomasa con alto contenido de lignina.

Explosión con CO ₂	Aumenta el área de superficie accesible; económico; no provoca la formación de compuestos inhibidores	No modifica la lignina ni la hemicelulosa.
Ozonólisis	Reduce el contenido de lignina; no produce residuos tóxicos	Se requiere gran cantidad de ozono; costoso.
Hidrólisis ácida	Hidroliza la hemicelulosa a xilosa y otros azúcares; altera la estructura de la lignina	Costo alto; corrosión de equipos; formación de sustancias tóxicas
Hidrólisis alcalina	Elimina la lignina y hemicelulosa; aumenta la superficie accesible	Se requieren largos tiempos de residencia; las sales formadas son irrecuperables e incorporadas a la biomasa
Pirolisis	Produce gas y líquido	Necesita altas temperaturas; produce cenizas

Fuente: Balat, 2011

Realizado por: Juan, Medina, 2022.

2.2.3.1. Trituración mecánica

Los materiales lignocelulósicos pueden ser reducidos de tamaño mediante una combinación de astillado, triturado y molienda para reducir la cristalinidad de la celulosa. El tamaño de los materiales suele ser de 10-30mm después del astillado y de 0.2-2mm después de la trituración y molienda (Balat 2011).

2.2.3.2. Pretratamiento ácido

Los pretratamientos ácidos normalmente tienen como objetivo altos rendimientos de azúcares a partir de materiales lignocelulósicos. El pretratamiento con ácido implica el uso de ácido sulfúrico, ácido nítrico o ácido clorhídrico para eliminar los componentes de hemicelulosa y exponer la celulosa para la digestión enzimática. Este pretratamiento puede operar ya sea a altas temperaturas y baja concentración de ácido, así como puede operar a bajas temperatura y alta concentración de ácido. La hidrólisis mediante ácido diluido se ha desarrollado con éxito para el pretratamiento de materiales lignocelulósicos. El pretratamiento funciona bastante bien en materias primas agrícolas. Si bien se sabe que el pretratamiento con ácido diluido mejora la

hidrólisis enzimática, su costo es relativamente alto en comparación con otros métodos de pretratamiento (Balat 2011).

En los últimos años, el tratamiento de la biomasa lignocelulósica con ácido sulfúrico diluido se ha utilizado principalmente como medio de hidrólisis de la hemicelulosa y pretratamiento para la hidrólisis enzimática de la celulosa. El ácido sulfúrico a concentraciones normalmente por debajo del 4% en peso ha sido de mayor interés, ya que es económico y efectivo. El pretratamiento con ácido sulfúrico diluido (0,2-2,0% de ácido sulfúrico, 384-493 K) de la lignocelulosa cumple dos funciones importantes en el proceso de conversión: (1) hidrólisis de los componentes de la hemicelulosa para producir una melaza de azúcares monoméricos, y (2) exposición de la celulosa para la digestión enzimática mediante la eliminación de la hemicelulosa y parte de la lignina (Balat 2011).

2.2.3.3. Pretratamiento alcalino

El pretratamiento alcalino se refiere a la aplicación de soluciones alcalinas para eliminar la lignina y diversas sustituciones de ácido urónico sobre la hemicelulosa que reducen la accesibilidad de la enzima a la hemicelulosa y celulosa. Estos procesos utilizan temperaturas y presiones más bajas en comparación con otras tecnologías de pretratamiento. El pretratamiento alcalino puede llevarse a cabo en condiciones ambientales, pero el tiempo de pretratamiento se mide en términos de horas o días en lugar de minutos o segundos. El sodio, hidróxido de potasio, calcio y amonio son productos químicos apropiados para el pretratamiento. De estos cuatro, el Na(OH) ha sido el más estudiado. El tratamiento con Na(OH) diluido causa la hinchazón de la biomasa, lo que lleva a un aumento en el área superficial, una disminución en la cristalinidad, separación de enlaces estructurales entre la lignina y los carbohidratos, y altera la estructura de la lignina (Balat 2011).

2.2.3.4. Explosión de vapor

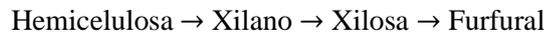
La explosión de vapor es el método más utilizado para el pretratamiento de materiales lignocelulósicos. El tratamiento de explosión de vapor aumenta la cristalinidad de la celulosa promoviendo la cristalización de porciones amorfas del material. En este método, la biomasa con vapor saturado a alta presión y luego la presión se reduce rápidamente, lo que hace que el material sufra una descomposición explosiva (Balat 2011).

El pretratamiento de explosión de vapor, en comparación con otros métodos de pretratamiento, ofrece una menor inversión de capital, un menor impacto ambiental y un mayor potencial para la producción de energía (Balat 2011).

2.2.4. Hidrólisis enzimática

Los polímeros de carbohidratos en los materiales lignocelulósicos necesitan convertirse en azúcares simples, a través de un proceso llamado hidrólisis. Los métodos más comunes aplicados pueden clasificarse en dos grupos: hidrólisis química (hidrólisis con ácido concentrado o diluido) e hidrólisis enzimática. Existen otros métodos de hidrólisis en los que no se aplican productos químicos ni enzimas. Por ejemplo, los materiales lignocelulósicos pueden hidrolizarse mediante radiación con rayos gamma o haz de electrones, o radiación de microondas. Sin embargo, estos métodos no son comercialmente importantes (Balat 2011).

Varios productos pueden resultar de la hidrólisis de material lignocelulósico. Cuando las hemicelulosas se hidrolizan a xilosa, se liberan manosa, ácido acético, galactosa y glucosa. La hidrólisis de la *hemicelulosa* puede generalizar como:



La celulosa se hidroliza a glucosa. Se propone la siguiente reacción para la hidrólisis de la celulosa:

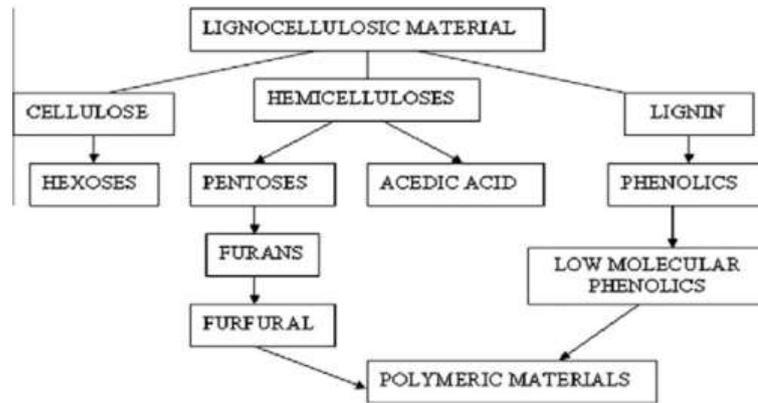
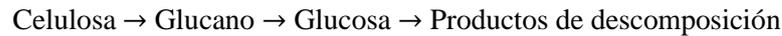


Ilustración 2-2: Principales productos que se producen durante la hidrólisis de materiales lignocelulósicos

Fuente: Balat, 2011

La hidrólisis ácida tiene una gran desventaja, cuando los azúcares son convertidos en productos de degradación como alquitranes. Esta degradación puede evitarse mediante el uso de enzimas que favorezcan una conversión selectiva del 100 % de celulosa a glucosa. Cuando la hidrólisis es catalizada por tales enzimas, el proceso se conoce como hidrólisis enzimática. La hidrólisis enzimática de materiales lignocelulósicos es un proceso muy lento ya que la hidrólisis de la celulosa es obstaculizada por la estructura del sustrato, el contenido de lignina y hemicelulosa, el

área superficial, y la cristalinidad de la celulosa. El costo de utilidad de la hidrólisis enzimática es bajo en comparación con la hidrólisis ácida o alcalina porque la hidrólisis enzimática generalmente se lleva a cabo en condiciones suaves (pH 4.8) y temperatura (318–323 K) y no tiene problemas de corrosión. La hidrólisis enzimática tiene rendimientos altos (75-85%). Es una alternativa ecológica que implica el uso de enzimas degradadoras de carbohidratos (*Celulasa* y *hemicelulasa*) para hidrolizar la lignocelulosa en azúcares fermentables (Balat 2011).

La concentración óptima para hidrolizar la materia lignocelulósica con *T. reesie* es de 1×10^7 UFC/ml a un pH de 4,8 y $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (Liming y Xueliang 2004).

2.2.4.1. Hidrólisis enzimática de la celulasa

La celulosa es típicamente hidrolizada por una enzima llamada celulasa. Estas enzimas son producidas por varios microorganismos, comúnmente por bacterias y hongos. Estos microorganismos pueden ser aeróbicos o anaeróbicos, mesófilos o termófilos. Bacterias pertenecientes a *Clostridium*, *Cellulomonas*, *Bacillus*, *Thermomonospora* y *Ruminococcus*, *Bacteriodes* pueden producir celulasa efectivamente. Hongos como *Sclerotium rolfii*, *P. chrysosporium* y especies de *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Schizophyllum* y *Penicillium* pueden producir celulasas. Cepas mutantes de *Trichoderma* sp. (*T. viridae*, *T. Reesei*, *T. longibrachiatum*) han sido durante mucho tiempo consideradas como las destructoras más productivas y poderosas de celulosa cristalina (Balat 2011).

La celulasa son un grupo de enzimas que hidrolizan sinérgicamente la celulosa. El mecanismo ampliamente aceptado para la hidrólisis enzimática de la celulosa implica acciones sinérgicas de la endoglucanasas (*EG*, *endo-1,4-β-D-glucanasa* o *EC 3.2.1.3.*), exocelulasa o celobiohidrolasa (*CBH*, *1,4- β-D-glucan celobiohidrolasa*, o *EC 3.2.1.91.*), y β-glucosidasas (*BGL*, *celobiosas* o *EC 3.2.1.21*). *EG* hidroliza los enlaces β-1,4-glucosídeos intermoleculares accesibles de cadenas de celulosa al azar para producir nuevos extremos de cadena; *CBH* corta progresivamente las cadenas de celulosa para liberar celobiosa o glucosa soluble; y *BGL* hidroliza la celobiosa a glucosa para eliminar la inhibición de la celobiosa. *BGL* completa el proceso de hidrólisis al catalizar la hidrólisis de celobiosa a glucosa (Balat 2011).

Las características de la celulasa que afectan a la hidrólisis son: la estructura molecular de la celulosa, la cristalinidad de la celulosa, el área superficial de la fibra de celulosa, el gado de hinchamiento de la fibra de la celulosa, el grado de polimerización y la lignina asociada u otros materiales (Balat 2011).

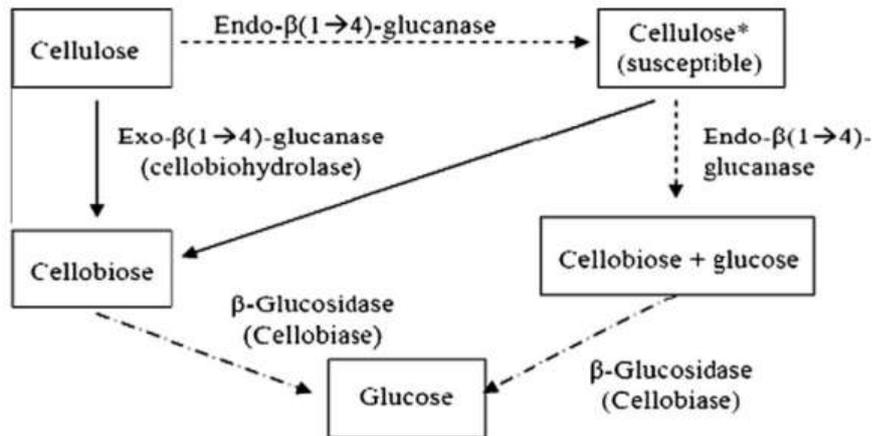


Ilustración 2-3: Modo de acción de las enzimas celulolíticas

Fuente: Balat, 2011

2.2.5. Usos de los azúcares fermentables

Los azúcares fermentables son sustancias que pueden ser utilizadas por ciertas bacterias y hongos para producir energía a través del proceso de fermentación. Algunos de los usos más comunes incluyen (Rodríguez et al. 2017).

2.2.5.1. Producción de bebidas alcohólicas

Los azúcares fermentables como la glucosa, fructosa y sacarosa se pueden usar para la producción de cerveza, vino y otro tipo de bebidas alcohólicas (Rodríguez et al. 2017).

2.2.5.2. Producción de alimentos

Los azúcares fermentables también se pueden utilizar para la producción de alimentos como yogurt (Díaz Rendón 2020).

2.2.5.3. Producción de productos químicos

Los azúcares fermentables se pueden utilizar para producir productos químicos como ácido cítrico, ácido láctico y ácido acético (Díaz Rendón 2020).

2.2.5.4. Generación de energía

Los azúcares fermentables se pueden utilizar como fuente de energía en procesos industriales y para la producción de biocombustibles (GRACIDA RODRÍGUEZ y PÉREZ-DÍAZ 2014).

2.2.5.5. Tratamiento de residuos

Los azúcares fermentables también pueden utilizar en procesos de tratamiento de residuos para producir biogás y reducir la cantidad de residuos sólidos (Guevara et al. 2012).

2.2.6. Composición de los azúcares fermentables

Los azúcares fermentables son la parte líquida que queda después de la hidrólisis enzimática de la biomasa lignocelulósica.

Tabla 2-2: Composición de los azúcares fermentables

Contenido	Rango
Sólidos totales	4.78-10.4
Cenizas totales	0.05-0.08
pH	4.6-4.8
Brix	11.3-22.7

Fuente: Dagnino et al. 2014

Realizado por: Juan, Medina, 2022.

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de estudio

El diseño de un proceso industrial para la obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín de ciprés (*Cupressus lisitanica Miller*) es un tipo de proyecto técnico, en el cual se revisará normativas y técnicas para desarrollarlo de manera exitosa. De la misma manera, se empleará los conocimientos de operaciones y procesos unitarios que se ha adquirido durante la carrera, para alcanzar los objetivos propuestos.

3.2. Métodos

Este proyecto es de tipo técnico por lo cual se basará en métodos científicos como el deductivo, experimental e inductivo con el fin de que su desarrollo permita alcanzar los objetivos planteados.

3.2.1. Método deductivo

Con la ayuda de bibliografía acerca del tema a investigar se tuvo un panorama de manera general, estableciendo un proceso y diseño de este a un nivel industrial obteniendo la mayor efectividad tanto en los costos como en el producto final.

3.2.2. Método experimental

Fue el método apropiado para obtener azúcares fermentables a nivel de laboratorio y a partir de los datos obtenidos allí dimensionar los equipos a nivel industrial. Además, con este método se logró la caracterización tanto de la materia prima como del producto final.

3.2.3. Método inductivo

Los aserraderos de la ciudad de Riobamba acumulan la mayoría de su aserrín para lo cual se generó una solución en general. Los propietarios de los aserraderos venden una parte de su aserrín a empresas donde se fabrica planchas de madera prensada el resto de aserrín que no se vende queda como desperdicio y se lo quema. Una solución que se da es utilizar este aserrín sobrante para la producción de azúcares fermentables.

3.3. Parte experimental

3.3.1. Obtención de los azúcares fermentables

3.3.1.1. Recolección del aserrín

Se recolecto el aserrín de un aserradero de la ciudad de Riobamba proveniente del corte de tablones de ciprés (*C. lusitánica Miller*) en una sierra de banco, en el cual el aserrín que se obtiene es de menor tamaño que en el resto de las máquinas.

3.3.1.2. Secado del aserrín

El secado del aserrín se dio con el fin de disminuir la humedad, este proceso se lo realizo exponiendo el aserrín al sol durante 2 días en la intemperie. Sin embargo, en algunos aserraderos de la ciudad de Riobamba el aserrín se encuentra expuesto al sol diariamente, por lo que no es necesario este paso.

3.3.1.3. Molienda del aserrín

El tamaño de las partículas de aserrín proveniente del aserradero no eran uniformes por esta razón se procedió a la molienda en una licuadora *OSTER*, la misma que está ubicada en la Facultad de Ciencias en el laboratorio de Operaciones Unitarias.

3.3.1.4. Tamizado del aserrín

Para el tamizado se utilizó la torre de tamices con 4 luces de malla diferentes: 500 μm , 250 μm , 125 μm , 63 μm . Obteniendo, a simple vista, un mayor porcentaje de aserrín retenido en la malla de 125 μm . Por lo que se trabajó con un tamaño de partícula entre 250 μm y 125 μm .

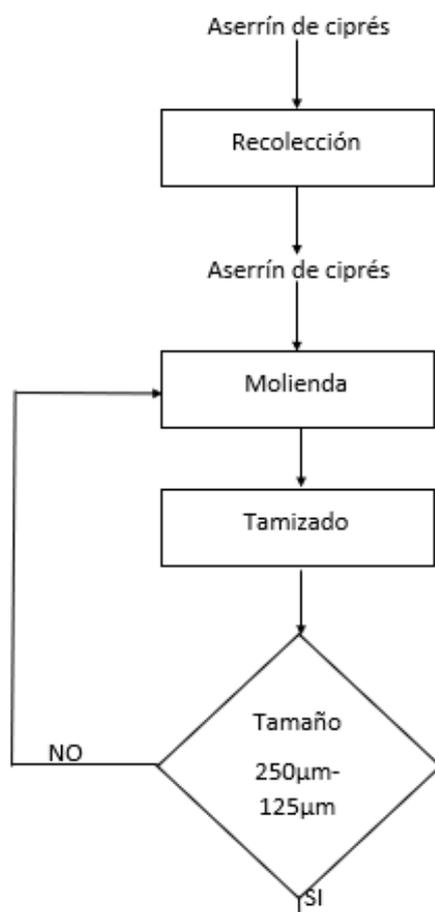


Ilustración 1-3: Diagrama del proceso de recolección, molienda y tamizado

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.3.1.5. Caracterización del aserrín

Para la caracterización de la materia prima se procedió a realizar las pruebas de determinación de humedad, determinación de cenizas y determinación de lignina por el método de Klason.

Tabla 1-3: Determinación de humedad del aserrín

Materiales	Cálculo
<ul style="list-style-type: none"> - Balanza de humedad - Recipiente 	<ul style="list-style-type: none"> - Tomar el porcentaje de humedad directamente del display de la balanza de humedad.
Procedimiento	<ul style="list-style-type: none"> - En un recipiente que soporte el calor colocar el aserrín, no es necesario pesarlo. - Pulsar el botón iniciar en la balanza de humedad y esperar durante 20 min.

	<ul style="list-style-type: none"> - Después de 20 min en el display se muestra el porcentaje de humedad de la muestra.
--	--

Fuente: Laboratorio de Aguas, 2022

Realizado por: Juan, Medina, 2022

Tabla 2-3: Determinación de cenizas totales del aserrín

Materiales	Cálculo
<ul style="list-style-type: none"> - Mufla - Desecador con desecante - Reverbero - Crisol - Pinzas - Balanza analítica 	$\%Cenizas = \frac{P_{cenizas}}{P_{muestra}}$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - %Cenizas: Porcentaje de cenizas totales(%) - $P_{cenizas}$: Masa de las cenizas(g) - $P_{muestra}$: Masa de la muestra inicial(g)
Procedimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Se pesó el crisol vacío previamente tratado(4 horas en la estufa a 105°C) y desecado, hasta obtener peso contante. - Se Pesó 1g de muestra en el crisol. - Se llevo el crisol hasta el reverbero y se lo dejo allí hasta carbonizar(que la muestra se torne de color negro y que no exista visualización de humo). - Se coloco el crisol en la mufla a una temperatura de 500°C durante 1 hora. - Se sacó el crisol y se puso en el desecador durante 15 min. - Se pesó el crisol. - Se colocó de nuevo en la estufa, repitiéndose el proceso hasta obtener un peso constante.

Fuente: Laboratorio de Metalurgia, 2022

Realizado por: Juan, Medina, 2022

Tabla 3-3: Determinación de la lignina por el método de Klason

Materiales y reactivos	Cálculo
<ul style="list-style-type: none"> - Vaso de precipitado 	$\%Lignina = \left(\frac{P_1}{P_2} * 100 \right) * \left(1 - \frac{E_T}{100} \right)$

<ul style="list-style-type: none"> - Kitasato - Embudo Büchner - Filtro de papel - Bomba de vacío - Vidrio reloj - Ácido sulfúrico 	<p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - %<i>Lignina</i>: Lignina insoluble en ácido (%) - P_1: Masa final de la muestra seca (g) - P_2: Masa inicial de la muestra seca(g) - E_T: Extraíbles totales en etanol y agua (%)
<p>Procedimiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pesar 1g de muestra seca (P_2). - Mezclar bien con 15 ml de H₂SO₄ al 72% y dejar reposar por 24 horas. - Trasvasar a un matraz de 1000ml y añadir 560ml de H₂O para pasar de 72% al 3% de H₂SO₄. - Ebullición durante 4 horas manteniendo el volumen constante añadiendo agua caliente. - Lavar el sólido filtrado con abundante agua caliente hasta que el pH del agua de lavado no sea ácido. - Secar en una estufa a 105°C durante 12 horas y pesar (P_1). - Para obtener los extraíbles totales, primero, se utiliza agua caliente para eliminar una parte de los componentes que no constituyen las paredes estructurales de la madera. Al mismo tiempo se utiliza una solución de etanol-benceno (1:1 volumen) para extraer ceras, grasas, resinas, carbohidratos de bajo peso molecular. Por último, se suman los 2 pesos de extraíbles para obtener (E_T).

Fuente: Laboratorio de Química Orgánica, 2022

Realizado por: Juan, Medina, 2022

Para determinar el contenido de celulosa se basa en el método ANSI/ASTM D1103-60.

Tabla 4-3: Determinación de la celulosa en el aserrín

Materiales y reactivos	Cálculo
------------------------	---------

<ul style="list-style-type: none"> - Vaso de precipitado - 2g de aserrín - Hidróxido de sodio - Barrilla de agitación - Agua destilada - Reverbero - Papel filtro - Ácido acético - Bomba de vacío - Embudo Büchner - Caja Petri - Estufa - Desecador con desecante 	$Celulosa(\%) = \frac{(PT + PL) * PML - PB}{PMT} * 100$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - PB: Peso bruto de la muestra (g) - PT: Peso del papel filtro (g) - PL: Peso de lignina en 1g de aserrín (g) - PML: Peso de aserrín libre de extraíbles (g) - PMT: Peso de aserrín antes de la extracción (g)
<p style="text-align: center;">Procedimiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Agregar 2g de aserrín en un base de precipitado de 100ml. - Añadir 10ml de NaOH al 17.5%, agitar y dejar reposar por dos minutos, volver a agitar y dejar reposar por tres minutos. - Agregar 5ml de NaOH al 17.5%, agitar y dejar reposar por cinco minutos, repetir este paso una vez más. - Agregar 5ml de NaOH al 17.5%, agitar y dejar reposar por 30 minutos en baño María a 20°C ±3°C, después agregar 30ml de agua destilada, agitar y dejar reposar por 1h. - Posteriormente filtrar al vacío, seguido de un lavado de la muestra sólida con una mezcla que contiene 33ml de agua destilada y 25ml de NaOH al 17.5%, después

	<p>lavar, pero con solo 30ml de agua destilada.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nuevamente realizar dos lavados de la muestra sólida; uno con 15ml de una solución de ácido acético al 10% y después de 3min aplicar el vacío, y el segundo con 50 ml de agua destilada aplicando vacío. - Finalmente, colocar la muestra en una caja Petri y llevarla a la estufa a una temperatura de $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 2h, después transferir al desecador durante 15min, repetir el secado hasta un peso constante.
--	--

Fuente: Laboratorio de Química Orgánica, 2022

Realizado por: Juan, Medina, 2022

3.3.1.6. Pretratamiento del aserrín

Antes de comenzar con el proceso de obtención de los azúcares fermentables, se debe tratar al aserrín, para ello al aserrín se lo trató con ácido sulfúrico diluido para alterar la matriz de la lignina y que en el posterior paso las enzimas tengan una mayor accesibilidad.

Tabla 5-3: Pretratamiento del aserrín

Proceso	Descripción
Tratamiento ácido	Se preparó una solución de ácido sulfúrico diluido (3% H ₂ SO ₄ V/V) y se añadió 100ml a un vaso de precipitado de 250ml. Posteriormente se agregó 60g de aserrín con un tamaño de partícula entre 250µm y 125µm. Finalmente, al vaso de precipitado se lo colocó en la estufa a $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 1h.
Lavado	Después del pretratamiento ácido se pasó la muestra por un filtro con el propósito de separar el aserrín del líquido. Al aserrín

	pretratado se lo lavó con agua destilada hasta que el pH del agua fuese neutro.
--	---

Fuente: Laboratorio de Química Orgánica, 2022

Realizado por: Juan, Medina, 2022

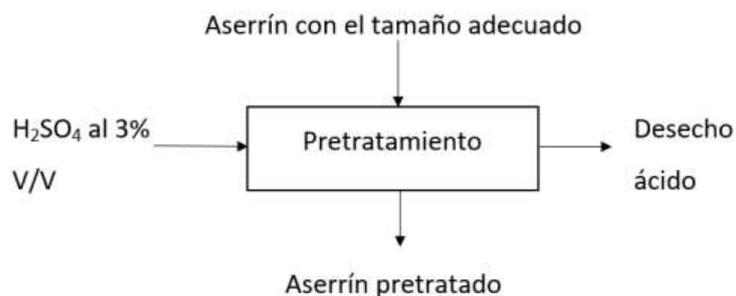


Ilustración 2-3: Diagrama del proceso de pretratamiento ácido

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.3.1.7. Hidrólisis del aserrín

La hidrólisis del aserrín se lo hizo con el hongo *Trichoderma reesei*, que libera enzimas específicas para la obtención de azúcares fermentables a partir de biomasa lignocelulósica. El hongo viene en forma líquida por lo que se procedió a variar la concentración de la enzima para obtener resultados replicables en la parte experimental. Durante el proceso se fue tomando el pH y temperatura.

Tabla 6-3: Hidrólisis enzimática del aserrín

Materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Enzima <i>Trichoderma Reesei</i>. - 3 frascos ámbar. - Una solución buffer que ajuste el pH a 4.7 - Filtros de papel. - 3 agitadores magnéticos. - 3 imanes. - Agua destilada. - Pipetas de 10mL. - Pera.
Procedimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Primero se prepara la solución buffer con ácido acético y acetato de sodio para ajustar el pH a 4.7

	<ul style="list-style-type: none"> - En cada uno de los frascos ámbar colocar 30g de aserrín pretratado, el imán y 100 ml de solución enzimática. - Posteriormente se procede a colocar según corresponda el volumen de enzimas en cada frasco junto con la solución buffer. - Finalmente, a los 3 frascos ámbar colocarlos en los agitadores magnéticos a $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y 250 rpm por 24h.
--	--

Fuente: Laboratorio de Química Orgánica, 2022

Realizado por: Juan, Medina, 2022

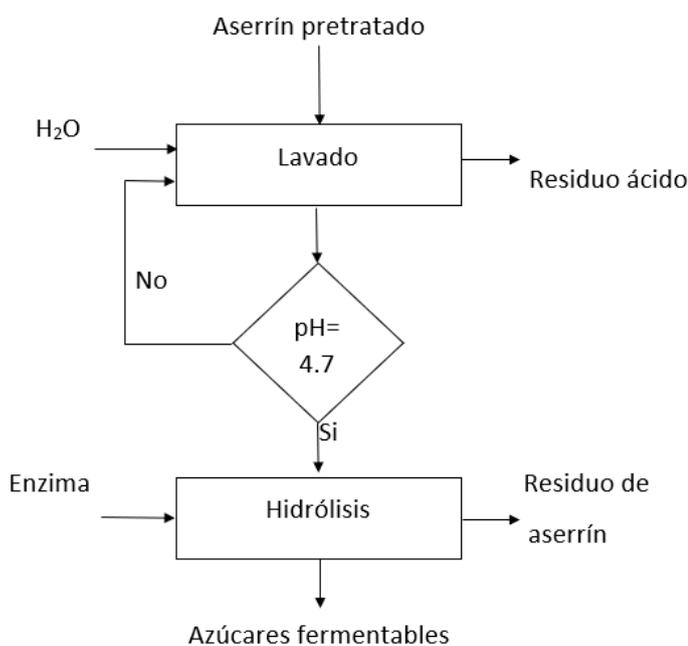


Ilustración 3-3: Diagrama del proceso de hidrólisis enzimática

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.3.1.8. Caracterización de los azúcares fermentables

Los azúcares fermentables no tienen una norma para su caracterización por lo que se siguió las instrucciones del laboratorio de investigación, bromatología y química orgánica de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. Por lo que se realizó las pruebas de sólidos totales, cenizas, pH, densidad, índice de refracción, °Brix y temperatura. Cabe mencionar que cada análisis se lo realizó por triplicado para obtener datos comparativos con respecto a los resultados.

Tabla 7-3: Determinación de sólidos totales de los azúcares fermentables

Materiales	Cálculo
<ul style="list-style-type: none"> - Estufa - Desecador - Cápsula - Pinzas - Balanza 	$ST = \left(\frac{M_2 - M_c}{V_m} \right) * 100$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ST: Sólidos totales (g/ml) - M_2: Masa de la cápsula con la muestra seca (g) - M_c: Masa de la cápsula vacía (g) - V_m: Volumen de la muestra (ml)
Procedimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Se pesó la cápsula vacía previamente tratada (4 horas en la estufa a 105°C) y desecada, hasta obtener peso constante. - Se pesó 50ml de muestra en la cápsula y se la colocó en un recipiente para realizar Baño María hasta que se reduzca el agua de la muestra. - Se secó con una toalla adsorbente la parte exterior de la cápsula. - Se colocó la cápsula en la estufa a 105°C durante 2h. - Se sacó la cápsula y se la colocó en el desecador. - Se dejó enfriar hasta que alcance a temperatura ambiente (30 minutos aproximadamente). - Se pesó la capsula. - Se colocó de nuevo en la estufa, repitiéndose el proceso hasta obtener un peso constante.

Fuente: Laboratorio de Metalurgia, 2022.

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

Tabla 8-3: Determinación de cenizas totales de los azúcares fermentables

Materiales	Cálculo
<ul style="list-style-type: none"> - Mufla - Reverbero - Desecador - Crisol - Pinzas - Balanza analítica 	$\%C_s = \left(\frac{M_2 - M_c}{M_1 - M_c} \right) * 100$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\%C_s$: Porcentaje de cenizas totales (%) - M_1: Masa de crisol con la muestra de ensayo (g) - M_2: Masa del crisol con la ceniza (g) - M_c: Masa del crisol vacío (g)

<p>Procedimiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se pesó el crisol vacío previamente tratado (4 horas en la estufa a 105°C) y desecado, hasta obtener peso constante. - Se pesó 5ml de muestra en el crisol. - Se llevó el crisol hasta el reverbero, que se encontraba en el extractor de gases hasta carbonizar (que la muestra se torne de color negro y que no exista visualización de humo). - Se colocó el crisol en la mufla a una temperatura de 500°C durante 2 horas. - Se sacó el crisol y se lo colocó en el desecador hasta que alcance a temperatura ambiente (30 minutos aproximadamente). - Se pesó el crisol. - Se colocó de nuevo en la estufa, repitiéndose el proceso hasta obtener un peso constante.
-----------------------------	---

Fuente: Laboratorio de Metalurgia, 2022.

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

Tabla 9-3: Determinación de pH de los azúcares fermentables

<p>Materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Potenciómetro - Vaso de precipitación de 250ml - Varilla de agitación
<p>Procedimiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se encendió el equipo previamente calibrado con las respectivas soluciones buffer (4, 7 y 10) - Se limpió el electrodo utilizando agua destilada. - En el vaso de precipitación de 250ml se colocó 100ml de la muestra. - Se agitó suavemente para homogeneizar la muestra. - Se introdujo el electrodo en el vaso de la muestra, sin que toque ninguna pared del mismo. - Se presionó medir y se esperó hasta que visualizó listo en la pantalla del equipo. - Se leyó la medida del pH y se registró el valor.

Fuente: Laboratorio de Química Orgánica, 2022.

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

Tabla 10-3: Determinación de la densidad de los azúcares fermentables

Materiales	Cálculo
<ul style="list-style-type: none"> - Balanza analítica - Picnómetro - Probeta de 10ml 	$\rho = \frac{P_2 - P_1}{V_p}$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ρ: Densidad (g/ml) - P_1: Peso del picnómetro vacío (g) - P_2: Peso de picnómetro con la muestra de ensayo (g) - V_p: Volumen del picnómetro (ml)
<p>Procedimiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se pesó el picnómetro vacío previamente tratado (4 horas en la estufa a 105°C) y desecado, hasta obtener peso constante. - Se tomó 10ml de jugo en una probeta de 10ml. - Se añadió los 10ml en el picnómetro. - Se pesó el picnómetro con la muestra en la balanza.

Fuente: Laboratorio de Investigación, 2022.

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

Tabla 11-3: Determinación de índice de refracción, °Brix y temperatura

<p>Materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Refractómetro - Pipeta de Pasteur - Vaso de precipitación de 50 ml - Varilla de agitación
<p>Procedimiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se calibró el equipo (se limpió la superficie con una toalla adsorbente y se agregó una gota de agua destilada, se cerró la tapa hasta que se calibre y, por último, se abrió la tapa y se limpió de nuevo la superficie). - Se colocó la muestra en el vaso de precipitación de 50 ml. - Se agitó suavemente para homogeneizar la muestra. - Se introdujo una gota de la muestra en la superficie del equipo. - Se presionó empezar y se esperó hasta que se visualizó los números sin cambio alguno en la pantalla. - Se registró el índice de refracción, °Brix y temperatura.

Fuente: Laboratorio de Investigación, 2022.

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.3.1.9. Diagrama del proceso de obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín

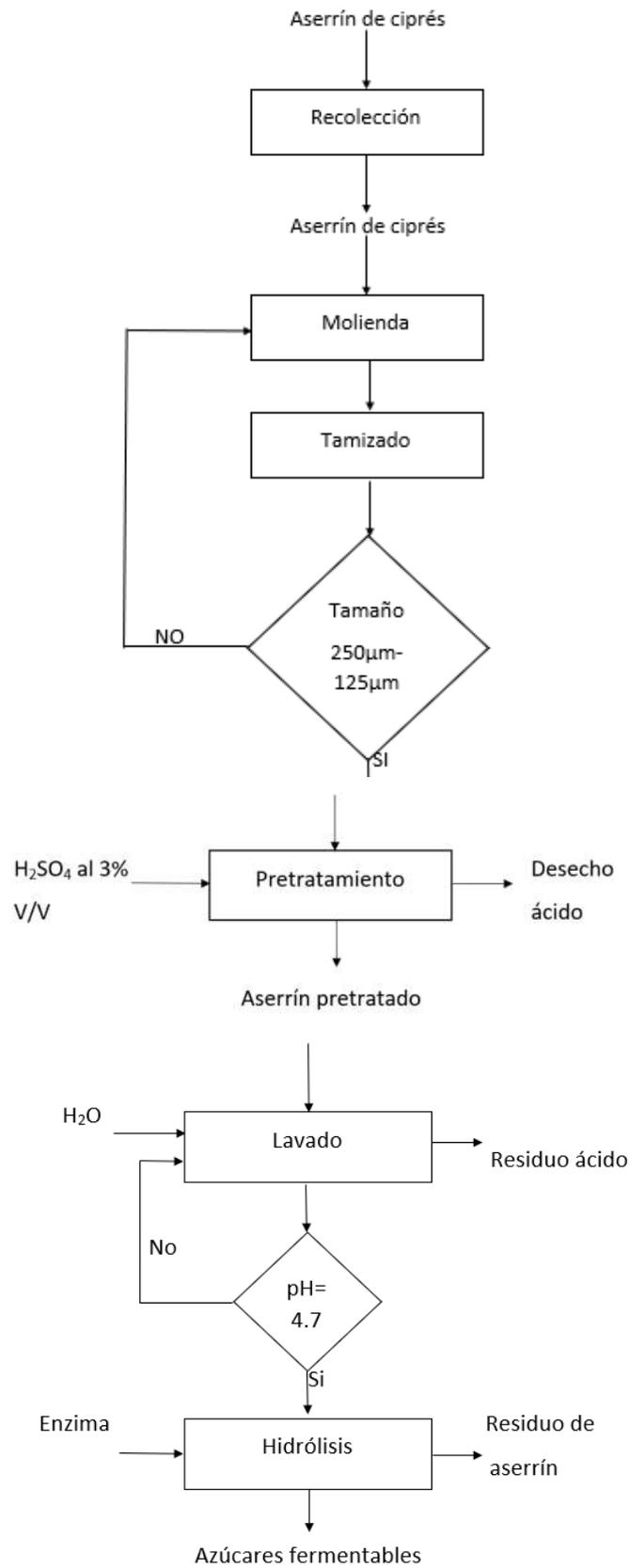


Ilustración 4-3: Diagrama del proceso de obtención de azúcares fermentables

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.4. Variables del proceso

Tabla 12-3: Variables del proceso de obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín

Variables	Tipo de variables	Subvariable	Concepto	Equipo o aparato de medición	Efecto en el proceso	Parámetros
Aserrín	Independiente		Tiempo en el cual en aserrín está relativamente seco	Balanza de humedad	Disminuir el peso de la materia prima	19.80% humedad
Molienda	Dependiente	Tiempo	Magnitud de la duración de la actividad	Cronometro	Tiempo en el cual se obtiene el aserrín molido	5 min
Tamizado	Dependiente	Tamaño de partícula	Magnitud de las partículas	Torre de tamices	Obtención de aserrín separado según el tamaño de partículas	Partículas entre 250µm y 125µm
Hidrólisis	Dependiente	Concentración	Magnitud volumétrica del ácido utilizado	Balón de aforo	Hidroliza el material lignocelulósico	1X10 ⁷ UFC/ml
	Independiente	Tiempo	Magnitud de la duración de la actividad	Cronometro	Tiempo en el cual se obtienen los azúcares fermentables	24h

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5. Datos experimentales

3.5.1. En la caracterización del aserrín

3.5.1.1. Humedad del aserrín

Tabla 13-3: Datos experimentales de la humedad en el aserrín

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	% Humedad
20	105	19.80

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.1.2. Cenizas totales

Tabla 14-3: Datos experimentales de cenizas totales en el aserrín

Tiempo (h)	Muestra 1 (g)	Muestra 2 (g)	Peso del crisol 1 (g)	Peso del crisol 2 (g)
2	40.3924	42.5473	39.3924	41.5473
4	40.1204	42.4193		
22	39.7410	41.8621		
24	39.5715	41.6723		
26	39.4002	41.5554		

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

- Cálculo del contenido de cenizas totales en el aserrín

$$\%Cenizas = \frac{P_{cenizas}}{P_{muestra}} \times 100$$
$$\%Cenizas = \frac{39.4002 - 39.3924}{40.3925 - 39.3924} \times 100$$
$$\%Cenizas = 0.68$$

Tabla 15-3: Contenido de cenizas totales del aserrín

Muestra	Cenizas totales (%)
1	0.78
2	0.81
Promedio	0.795

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.1.3. Lignina insoluble en ácido

Tabla 16-3: Datos experimentales de lignina insoluble en ácido

Muestra	Masa inicial de la muestra secada (g)	Masa final de la muestra secada (g)	Extraíbles totales (%)
1	1	0.2624	18.55
2	1	0.2398	17.96

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

- **Cálculo de lignina insoluble en ácido por el método de Klaxon**

$$\%Lignina = \left(\frac{P_1}{P_2} * 100 \right) * \left(1 - \frac{E_T}{100} \right)$$

$$\%Lignina = \left(\frac{0.2624}{1} * 100 \right) * \left(1 - \frac{18,55}{100} \right)$$

$$\%Lignina = 21.3725\%$$

Tabla 17-3: Contenido de lignina insoluble del aserrín

Muestra	Lignina insoluble (%)
1	21.3725
2	19.6732
Promedio	20.5228

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.1.4. Celulosa en aserrín

Tabla 18-3: Datos experimentales de contenido de celulosa en aserrín

Muestra	PB (g)	PT (g)	PL (g)	PML (g)	PMT (g)
1	2	0.8871	0.19	6.3971	11.5283
2	2	0.9102	0.19	6.4106	11.6014

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

- **Cálculo de celulosa en aserrín**

$$Celulosa(\%) = \frac{(PT + PL) * PML - PB}{PMT} * 100$$

$$Celulosa(\%) = \frac{(0.8871g + 0.1895g) * 6.3971g - 2g}{11.5283g} * 100$$

$$Celulosa(\%) = 42.58\%$$

Tabla 19-3: Contenido de celulosa en aserrín

Muestra	Contenido de celulosa (%)
1	42.58
2	43.90
Promedio	43.24

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.2. En el pretratamiento del aserrín

3.5.2.1. Pretratamiento ácido del aserrín

Tabla 20-3: Datos experimentales del pretratamiento ácido

Concentración de H ₂ SO ₄ (V/V)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Volumen de la solución ácida (ml)	Cantidad de aserrín (g)
3 %	95	2	100	62.2768

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.3. En el tratamiento enzimático del aserrín

3.5.3.1. Hidrólisis enzimática del aserrín

Tabla 21-3: Datos experimentales de la hidrólisis enzimática

Muestra	Concentración enzima (UFC/ml)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Volumen de la solución (ml)	pH de la solución	Cantidad de aserrín (g)
1	1X10 ⁵	48	24	100	4.94	34.9278
2	1X10 ⁶	45	24	100	4.89	35.0218
3	1X10 ⁷	47	24	100	4.75	35.0457

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.3.2. En el filtrado

Tabla 22-3: Datos experimentales en la filtración

Medio filtrante	P ₁ (g)	P ₂ (g)	P ₃ (g)
Papel filtro Whatman N2	8.563	11.797	39.67

Realizado por: Medina, Juan, 2022

3.5.3.3. Cálculo del porcentaje de sólidos retenidos

$$\%Retenido = \frac{P_2 - P_1}{P_3} \times 100$$

Donde:

P₁: Peso del papel filtrante Whatman N1 (g)

P₂: Peso del papel filtrante seco con la muestra (g)

P₃: Peso de la muestra que se filtró (g)

$$\%Retenido = \frac{11.797 - 8.563}{39.67} \times 100$$

$$\%Retenido = 8.15\%$$

3.5.4. En la caracterización de los azúcares fermentables

3.5.4.1. Sólidos totales

Tabla 23-3: Datos experimentales de los sólidos totales en los azúcares fermentables

Tiempo (h)	M _{C1M} (g)	M _{C2M} (g)	M _{C1} (g)	M _{C2} (g)	V _m (ml)
0	137.9743	140.8747	86.6122	89.5725	50
2	123.9581	128.9758			
4	109.3973	114.8570			
6	93.9487	98.7503			
22	91.9174	95.3862			
24	90.3585	93.1750			

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

- Cálculo del contenido de sólidos totales en los azúcares fermentables

$$ST = \left(\frac{M_2 - M_c}{V_m} \right) * 100$$

$$ST = \left(\frac{90.3585 - 86.6122}{50} \right) * 100$$

$$ST = 7.4926\%$$

$$ST = \frac{7.4926g}{100ml}$$

Tabla 24-3: Contenido de sólidos totales en el jugo de caña

Muestra	Sólidos totales (g/100ml)
1	7.4926
2	7.205
Promedio	7.3488

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.4.2. Cenizas totales

Tabla 25-3: Datos experimentales de cenizas totales en los azúcares fermentables

Tiempo (h)	M _{C1M} (g)	M _{C2M} (g)	M _{C1} (g)	M _{C2} (g)
0	42.4653	38.4646	38.8123	36.4949
2	41.3853	37.7545		
4	39.4352	37.4846		
6	39.2732	37.7497		
22	38.8564	36.5874		
24	38.8152	36.4963		
26	38.8152	36.4963		

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

- Cálculo del contenido de cenizas totales en los azúcares fermentables

$$\%C_s = \left(\frac{M_2 - M_c}{M_1 - M_c} \right) * 100$$

$$\%C_s = \left(\frac{38.8152 - 38.8123}{42.4653 - 38.8123} \right) * 100$$

$$\%C_s = 0.079\%$$

Tabla 26-3: Contenido de cenizas totales de los azúcares fermentables

Muestra	Cenizas totales (%)
1	0.079
2	0.071
Promedio	0.075

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.4.3. pH de los azúcares fermentables

Tabla 27-3: Datos experimentales del pH de los azúcares fermentables

Muestra	pH
1	4.75
2	4.89
3	4.92
Promedio	4.85

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.4.4. Densidad

Tabla 28-3: Datos experimentales de la densidad de los azúcares fermentables

Muestra	V _p (ml)	P ₁ (g)	P ₂ (g)
1	10	14.817	23.864
			23.753
			23.865

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

Donde:

P₁: Peso del picnómetro vacío (g)

P₂: Peso del Picnómetro con la muestra (g)

V_p: Volumen de la muestra en el picnómetro (ml)

- **Cálculo de la densidad**

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{V_p}$$
$$\rho = \frac{23.864 - 14.817}{10}$$
$$\rho = 0.905 \frac{g}{ml}$$

Tabla 29-3: Densidad de los azúcares fermentables

Muestra	ρ (g/ml)
1	0.905
2	0.8936
3	0.9048
Promedio	0.9011

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.5.4.5. Índice de refracción, Brix y temperatura

Tabla 30-3: Datos experimentales índice de refracción, Brix y temperatura

Muestra	Índice de refracción	Brix (°Bx)	Temperatura (°C)
1	1.33441	8.9	20
2	1.33428	9.4	20
3	1.33429	10.2	20

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

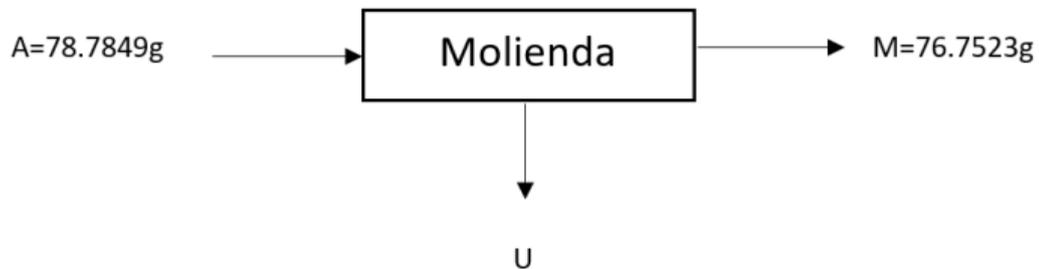
3.6. Balance de materia

El balance de materia se rige por la Ley de Conservación de la Materia, el cual nos dice que “La materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma”. Con los siguientes balances de materia se puede observar como el aserrín fue transformado en azúcares fermentables.

De manera general el balance de materia nos indica que todo lo que entra sale. Por lo que se puede establecer la siguiente ecuación:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

3.6.1. En la molienda



$$A = U + M$$

$$U = A - M$$

$$U = 78.7849g - 76.7523g$$

$$U = 2.0326g$$

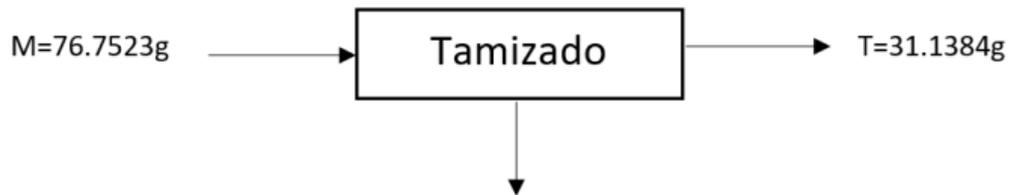
$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{Materia que sale}}{\text{Materia que entra}} * 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{76.7523g}{78.7849g} * 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = 97.42\%$$

En el proceso de molienda del aserrín se vio un rendimiento del 97.42% para aumentar el área superficial del aserrín. El 2.58% se perdió por las corrientes de aire presentes durante el proceso.

3.6.2. En el tamizado



$$M = T + P$$

$$P = M - T$$

$$P = 76.7523g - 31.1384g$$

$$P = 45.6139g$$

$$\%Rendimiento = \frac{\text{Masa total del tamizado o cernido}}{\text{Masa total de alimentación}} * 100$$

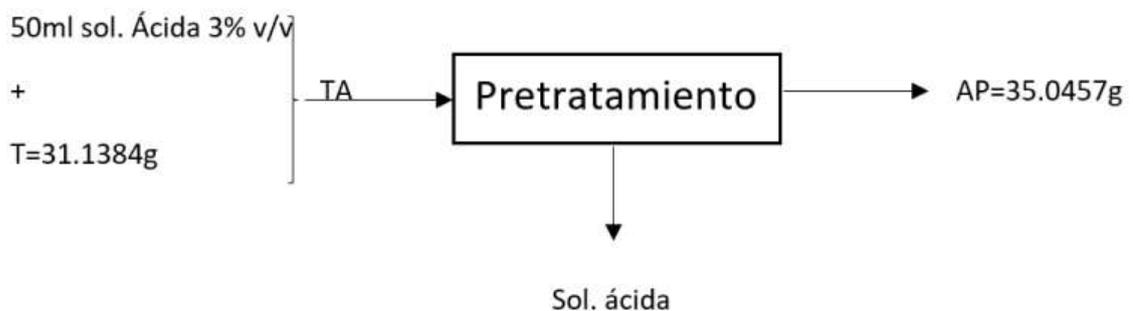
$$\%Rendimiento = \frac{31.1384g}{76.7523g} * 100$$

$$\%Rendimiento = 40.57\%$$

En el proceso de tamizado se obtuvo un rendimiento del 40.57%. Sin embargo, las partículas con mayor tamaño al requerido volvieron al proceso de molienda.

3.6.3. En el pretratamiento

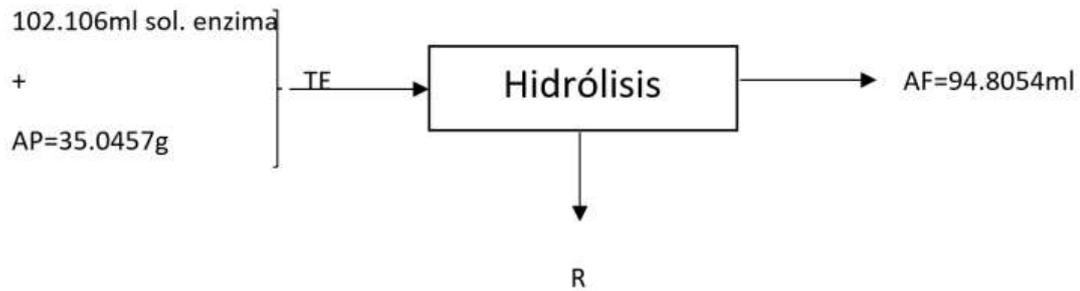
En el proceso de pretratamiento se mezclan los 31.1384g de aserrín con 50 ml de solución ácida de H₂SO₄ al 3% v/v.



Al final del proceso tendremos el aserrín pretratado y la solución ácida que se puede volver a usar.

3.6.4. En la hidrólisis

Para el volumen de entrada se tomó 100ml de solución enzimática por cada 35.0457g de aserrín.



$$TE = AF + R$$

$$R = TE - AF$$

$$R = 102.106ml - 94.8054ml$$

$$R = 7.3006ml$$

$$\%Rendimiento = \frac{Masa\ que\ sale}{Masa\ que\ entra} * 100$$

$$\%Rendimiento = \frac{94.8054ml}{102.106ml} * 100$$

$$\%Rendimiento = 92.85\%$$

El rendimiento de proceso de hidrólisis fue de 92.85% con respecto al volumen que se esperaba. El aserrín queda como residuo orgánico.

3.6.5. Rendimiento global del proceso de obtención de azúcares fermentables

Para obtener el rendimiento de la conversión de celulosa en azúcares fermentables se utiliza los grados Brix y el contenido de celulosa en el aserrín.

$$\%Rendimiento = \frac{(^{\circ}Brix) * (densidad)}{(masa\ de\ aserrín) * (\% \text{ de celulosa presente})} * 100$$

$$\%Rendimiento = \frac{(10.2^{\circ}Brix) * \left(0.9011 \frac{g}{ml}\right)}{(31.1384g) * (0.4324)} * 100$$

$$\%Rendimiento = 68.26\%$$

El rendimiento global es de 68.26%, es decir que se obtuvieron 68.26g de azúcares a partir de 100g de celulosa contenida en el aserrín.

3.7. Dimensionamiento de los equipos

3.7.1. Diseño del recipiente de recepción

3.7.1.1. Cantidad de aserrín de ciprés a utilizar para la producción de un aserradero

En la ciudad de Riobamba un aserradero típico produce cerca de 5000kg de aserrín al mes de los cuales solo una décima parte es aserrín de madera de ciprés. Por lo que en un mes un aserradero puede llegar a producir aproximadamente 500kg de aserrín de ciprés. Para determinar la masa de aserrín por unidad de volumen se tomó la densidad aparente de 200kg/m³.

3.7.1.2. Volumen a ocupar por el aserrín

$$V_{\text{aserrín}} = \frac{\text{Masa de aserrín}}{\text{Densidad de aserrín}}$$
$$V_{\text{aserrín}} = \frac{500\text{kg}}{200\text{kg/m}^3}$$
$$V_{\text{aserrín}} = 2.5 \frac{\text{m}^3}{\text{lote}}$$

3.7.1.3. Volumen total del recipiente

Se va a considerar un factor de seguridad del 15%

$$V_{\text{recipiente}} = V_{\text{aserrín}} * 1.15$$
$$V_{\text{recipiente}} = 2.5\text{m}^3 * 1.15$$
$$V_{\text{recipiente}} = 2.875\text{m}^3$$

3.7.2. Diseño del molino de aserrín

Un molino no posee ecuaciones que ayuden a su diseño por lo tanto se ha buscado la mejor opción de equipo para el proceso, de manera que es económico y efectivo en el trabajo

Tabla 31-3: Características de un molino de aserrín

Detalles	Equipo
Fabricante	LIYANG TONGFU MACHINERY
Marca	TF
Precio (\$)	3000

Energía (kw)	45
Dimensiones (mm)	2250 x 1360 x 2800
Peso (kg)	850
Productividad (kg/h)	907kg/h
Voltaje (V)	380
Revoluciones por minuto	3600

Fuente: Alibaba.com, 2022.

Realizado por: Juan, Medina, 2022.

3.7.2.1. Cantidad estimada de aserrín obtenido por la molienda

$$O_{molida} = \frac{\%rendimiento * A_{entra}}{100}$$

$$O_{molida} = \frac{97.42\% * 500kg}{100}$$

$$O_{molida} = 487.1 \frac{kg}{lote}$$

Tomando en cuenta el rendimiento de 97.42% obtenido en el proceso de molienda realizado en la experimentación la cantidad de aserrín a tamizar es de 487.1kg.

3.7.3. Diseño del tamiz de aserrín

Tabla 32-3: Características de un tamiz lineal para el aserrín

Detalle	Equipo
Fabricante	Xinxiang Dahan Vibrating Machinery Co, Ltd.
Marca	DAHAN
Nombre	Micronized Sawdust Linear Vibration Sieve Machine
Precio (\$)	860
Capacidad (t/h)	0.05-5
Peso (kg)	300
Granularidad (mm)	0.125 – 0.063
Voltaje (V)	220/380
Dimensiones (mm)	2199 x 808 x 878

Fuente: Alibaba.com, 2022a.

Realizado por: Juan, Medina, 2022.

$$\text{Masa total del tamizado o cernido} = \frac{\% \text{rendimiento} * \text{Masa total de alimentación}}{100}$$

$$\text{Masa total del tamizado o cernido} = \frac{40.57 * 487.1 \text{kg}}{100}$$

$$\text{Masa total del tamizado o cernido} = 197.62 \frac{\text{kg}}{\text{lote}}$$

Con un rendimiento del 40.57% se tiene un total de masa tamizada de 197.62kg para el pretratamiento ácido.

3.7.4. Diseño de un equipo de pretratamiento

Después de analizar los diferentes tipos de equipos que ayudarían en el pretratamiento ácido se eligió que el reactor más apropiado es de tipo Batch, debido a su fácil manejo, menor costo de implementación y su utilidad es alta en operaciones sencillas, como el caso de este proyecto (Worstell 2015).

El equipo de pretratamiento, así como sus componentes son de acero inoxidable.

3.7.4.1. Volumen total del reactor para el pretratamiento

Teniendo en cuenta los datos de la parte experimental donde se utilizó 60g de aserrín por cada 100ml de solución se obtiene el volumen requerido del reactor para una masa total de aserrín tamizado de 197.62kg. Tomando en cuenta un factor de seguridad del 15%.

$$V_{pretra} = \left(M_{tamizada} * \frac{0.1l}{0.01kg} * \frac{1m^3}{1000l} \right) * 1.15$$

$$V_{pretra} = \left(197.62kg * \frac{0.1l}{0.01kg} * \frac{1m^3}{1000l} \right) * 1.15$$

$$V_{pretra} = 2.273m^3$$

3.7.4.2. Diámetro del reactor para el pretratamiento

$$D_{pretra} = \sqrt[3]{\frac{12 * V_{pretra}}{\pi * 4.6}}$$

$$D_{pretra} = \sqrt[3]{\frac{12 * 2.273m^3}{\pi * 4.6}}$$

$$D_{pretra} = 1.2358m$$

3.7.4.3. Diámetro total del reactor para el pretratamiento

Por diseño se debe multiplicar por el factor de seguridad fs para prevenir que el volumen no se vea afectado por los materiales que forman parte del equipo.

$$\begin{aligned}D_{Tpretra} &= D_{pretra} * fs \\D_{Tpretra} &= 1.2358m * 1.15 \\D_{Tpretra} &= 1.421m\end{aligned}$$

3.7.4.4. Altura del reactor para el pretratamiento

$$\begin{aligned}h_{pretra} &= \frac{V_{pretra}}{\pi * r^2} \\h_{pretra} &= \frac{2.273m^3}{\pi * \left(\frac{1.421m}{2}\right)^2} \\h_{pretra} &= 1.4332m\end{aligned}$$

3.7.4.5. Altura total del reactor para el pretratamiento

Al valor de la altura se lo multiplica por un factor de seguridad fs

$$\begin{aligned}h_{Tpretra} &= h_{pretra} * fs \\h_{Tpretra} &= 1.4332m * 1.15 \\h_{Tpretra} &= 1.6482m\end{aligned}$$

3.7.4.6. Volumen total del reactor de pretratamiento

$$\begin{aligned}V_{Tpretra} &= \pi * \left(\frac{D_{Tpretra}}{2}\right)^2 * h_{Tpretra} \\V_{Tpretra} &= \pi * \left(\frac{1.421m}{2}\right)^2 * 1.6482m \\V_{Tpretra} &= 2.6138m^3\end{aligned}$$

3.7.4.7. Dimensionamiento de las partes del sistema de agitación del reactor

Tabla 33-3: Igualdades para un sistema de agitación estándar para un reactor

$\frac{D_{AF}}{D_{TF}} = \frac{2}{5}$	$\frac{H_F}{D_{TF}} = \frac{9}{10}$	$\frac{R_F}{D_{TF}} = \frac{1}{72}$
$\frac{E_F}{D_{AF}} = \frac{1}{3}$	$\frac{W_F}{D_{AF}} = \frac{1}{5}$	$\frac{B_F}{D_{AF}} = \frac{7}{20}$

Fuente: Atiemo-Obeng, 2004; citado en Aguilera y Ramírez, 2017: p.77

Donde:

D_{TF} : Diámetro del reactor

D_{AF} : Diámetro del agitador

H_F : Altura que ocupa el liquido

R_F : Longitud entre la pared del reactor y los deflectores

E_F : Longitud que separa el fondo del reactor hasta el rodete

W_F : Ancho de las aspas de la turbina

B_F : Ancho de la placa deflectora

Teniendo estas relaciones para el diseño y sabiendo que D_T mide 1.36m, se encontraron los resultados de las demás partes del sistema de agitación para el reactor de pretratamiento.

Tabla 34-3: Dimensiones de las partes del reactor con su sistema de agitación

D_{TF} (m)	D_{AF} (m)	H_F (m)	R_F (m)	E_F (m)	W_F (m)	B_F (m)
1.421	0.5684	1.2789	0.0197	0.1894	0.1137	0.1989

Realizador por: Medina, Juan, 2022.

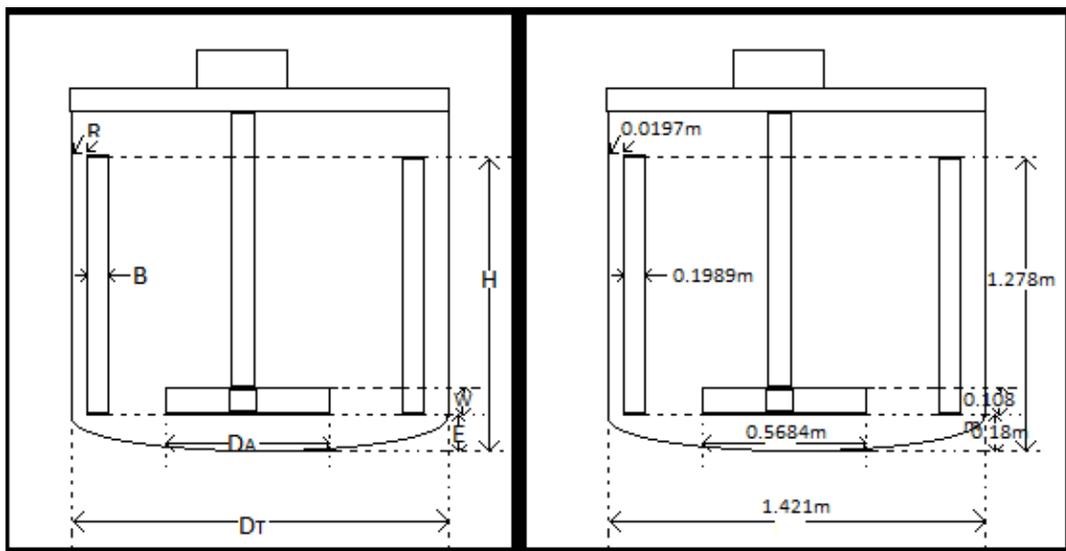


Ilustración 1-3: Diseño del reactor con sus respectivas partes

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.7.4.8. Cálculo del número de Reynolds del pretratamiento

Según (Dewangan y Saha 2021) la viscosidad de una mezcla entre un líquido y el aserrín en una proporción 1:10 es de $4.262 \times 10^{-3} \frac{kg}{ms}$. También nos indica la densidad que toma un valor de $687 \frac{kg}{m^3}$

$$Re = \frac{D_A^2 * N * \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{(0.5684m)^2 * 1 \frac{rev}{s} * 687 \frac{kg}{m^3}}{4.262 \times 10^{-3} \frac{kg}{ms}}$$

$$Re = 52077.6562$$

Como el Número de Reynolds es mayor a 4000 se dice que el flujo es turbulento en la etapa de pretratamiento.

3.7.4.9. Cálculo de la potencia que necesita el sistema de agitación

$$P = N_p * D_A^5 * N^3 * \rho$$

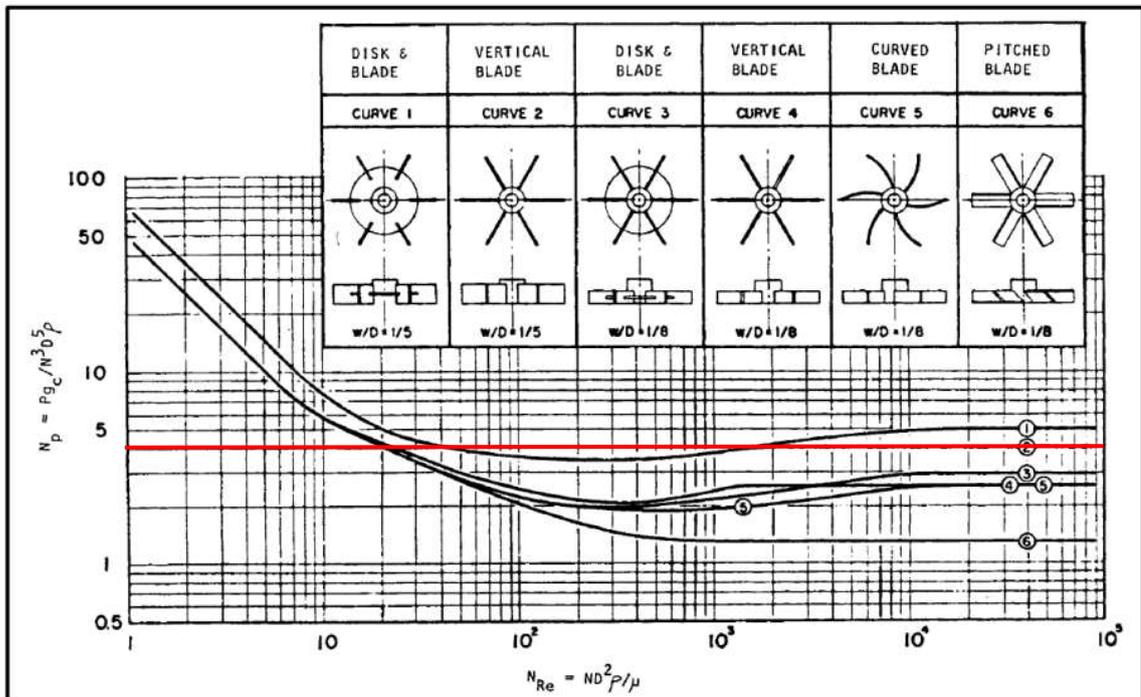


Ilustración 2-3: Número de Reynolds vs Número de potencia para tipos de agitadores tipo turbina

Fuente: Walas, 1990; citado en Ricaurte, 2016.

El número de potencia para este diseño de agitador de tipo turbina Vertical Blade para el reactor de pretratamiento viene dada por la tabla, tomando el valor de 4.

$$P = 4 * (0.5684\text{m})^5 * \left(1 \frac{\text{rev}}{\text{s}}\right)^3 * 687 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P = 163.037\text{W}$$

$$P = 0.2186\text{HP}$$

3.7.4.10. Potencia real necesaria para el sistema de agitación del reactor del pretratamiento

En realidad, la eficiencia no es del 100% por lo que se requiere una mayor potencia

$$PF_{real} = \frac{PF}{n}$$

$$PF_{real} = \frac{0.2186\text{HP}}{0.80}$$

$$PF_{real} = 0.2732\text{HP}$$

3.7.4.11. Tiempo de agitación en el reactor de pretratamiento

$$t_{aP} = \frac{5.20 * D_T^2}{N_p^{\frac{1}{3}} * N * D_A^2}$$

$$t_{aP} = \frac{5.20 * (1.421)^2}{(4)^{\frac{1}{3}} * \left(1 \frac{\text{rev}}{\text{s}}\right) * (0.5684)^2}$$

$$t_{aP} = 20.4737 \text{ s}$$

El tiempo de agitación para alcanzar la mezcla homogénea de un 95% entre la solución ácida y el aserrín es 20.4737s.

3.7.4.12. Sistema de calentamiento

Para el pretratamiento ácido de la materia lignocelulósica se recomienda una temperatura de $90^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, ideal para que el ácido pueda atacar y destruir la matriz lignocelulósica.

El sistema de calentamiento a diseñar es el de enchaquetado o chaqueta de calentamiento, se lo ha elegido por su costo económico y facilidad de mantenimiento frente a otros sistemas como serpentín o resistencias.

- *Diámetro de la chaqueta de calentamiento*

$$D_C = D_{TF} + 0.1 * D_{TF}$$

$$D_C = 1.421m + 0.1 * 1.421m$$

$$D_C = 1.5631m$$

- *Espesor de la chaqueta de calentamiento*

$$E_C = D_C - D_{TF}$$

$$E_C = 1.5631m - 1.421m$$

$$E_C = 0.1421m$$

- *Altura de la chaqueta de calentamiento*

$$h_c = h_{Tpretra} + E_C$$

$$h_c = 1.6482m + 0.1421m$$

$$h_c = 1.7903m$$

- *Volumen de la chaqueta de calentamiento*

$$V_C = \pi * \left(\frac{D_C}{2}\right)^2 * h_c - \pi * \left(\frac{D_T}{2}\right)^2 * h_{Tpretra}$$

$$V_C = \pi * \left(\frac{1.5631m}{2}\right)^2 * 1.7903m - \pi * \left(\frac{1.421m}{2}\right)^2 * 1.6482m$$

$$V_C = 0.8216m^3$$

- *Calor necesario en la chaqueta de calentamiento*

$$Q_{ch} = m * C_{pj} * \Delta T$$

Con la ayuda de (Casanova, Solís y Carrillo 2017) se puede saber el valor del calor específico de la mezcla aserrín agua que se utilizó en el presente proyecto.

$$C_{pj} = 4.136 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

Esperando que la temperatura máxima en este proceso sea 50°C

$$Q_{ch} = 1061.491kg * 4.136 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (90^{\circ}C - 15^{\circ}C)$$

$$Q_{ch} = 329274.5082 kJ$$

3.7.5. Diseño de un equipo para la hidrólisis enzimática

Después de analizar los diferentes tipos de equipos que ayudarían al proceso de hidrólisis se eligió el biorreactor tipo Batch que es el más apropiado debido a su fácil manejo, costo de implementación y su utilidad para operaciones sencillas, como es el caso de este proyecto. Cabe mencionar que el equipo y todos sus componentes son de acero inoxidable.

3.7.5.1. Volumen total del biorreactor para la hidrólisis

Teniendo en cuenta los datos de la parte experimental donde se utilizó 30g de aserrín por cada 100ml de solución se obtiene el volumen requerido del biorreactor para una masa total de aserrín pretratado de 197.62kg. Tomando en cuenta un factor de seguridad del 15%.

$$V_{hidrolisis} = \left(M_{Pretra} * \frac{0.1l}{0.005kg} * \frac{1m^3}{1000l} \right) * 1.15$$

$$V_{hidrolisis} = \left(197.62kg * \frac{0.1l}{0.005kg} * \frac{1m^3}{1000l} \right) * 1.15$$

$$V_{hidrolisis} = 4.5453m^3$$

3.7.5.2. Diámetro del biorreactor para la hidrólisis

$$D_{hidrolisis} = \sqrt[3]{\frac{12 * V_{hidrolisis}}{\pi * 4.6}}$$

$$D_{hidrolisis} = \sqrt[3]{\frac{12 * 4.5453m^3}{\pi * 4.6}}$$

$$D_{hidrolisis} = 1.5569m$$

3.7.5.3. Diámetro total del biorreactor para la hidrólisis

Por diseño se debe multiplicar por el factor de seguridad f_s para prevenir que el volumen no se vea afectado por los materiales que forman parte del equipo.

$$D_{Thidrolisis} = D_{hidrolisis} * fs$$

$$D_{Thidrolisis} = 1.5569m * 1.15$$

$$D_{Thidrolisis} = 1.7905m$$

3.7.5.4. Altura del biorreactor para la hidrólisis

$$h_{hidrolisis} = \frac{V_{hidrolisis}}{\pi * r^2}$$

$$h_{hidrolisis} = \frac{4.5453m^3}{\pi * \left(\frac{1.7905m}{2}\right)^2}$$

$$h_{hidrolisis} = 1.8052m$$

3.7.5.5. Altura total del biorreactor para la hidrólisis

Al valor de la altura se lo multiplica por un factor de seguridad fs

$$h_{Thidrolisis} = h_{hidrolisis} * fs$$

$$h_{Thidrolisis} = 1.8052m * 1.15$$

$$h_{Thidrolisis} = 2.0759m$$

3.7.5.6. Volumen total del biorreactor para la hidrólisis

$$V_{Thidrólisis} = \pi * \left(\frac{D_{Thidrólisis}}{2}\right)^2 * h_{Thidrólisis}$$

$$V_{Thidrólisis} = \pi * \left(\frac{1.7905m}{2}\right)^2 * 2.0759m$$

$$V_{Thidrólisis} = 5.2269m^3$$

3.7.5.7. Dimensionamiento de las partes del sistema de agitación del biorreactor

Tabla 35-3: Igualdades para un sistema de agitación estándar para un biorreactor

$\frac{D_{AF}}{D_{TF}} = \frac{2}{5}$	$\frac{H_F}{D_{TF}} = \frac{9}{10}$	$\frac{R_F}{D_{TF}} = \frac{1}{72}$
$\frac{E_F}{D_{AF}} = \frac{1}{3}$	$\frac{W_F}{D_{AF}} = \frac{1}{5}$	$\frac{B_F}{D_{AF}} = \frac{7}{20}$

Fuente: Atiemo-Obeng, 2004; citado en Aguilera y Ramírez, 2017: p.77

Donde:

D_{TF} : Diámetro del biorreactor

D_{AF} : Diámetro del agitador

H_F : Altura que ocupa el líquido

R_F : Longitud entre la pared del biorreactor y los deflectores

E_F : Longitud que separa el fondo del biorreactor hasta el rodete

W_F : Ancho de las aspas de la turbina

B_F : Ancho de la placa deflectora

Teniendo estas relaciones para el diseño y sabiendo que D_T mide 1.7905m, se encontraron los resultados de las demás partes del sistema de agitación para el biorreactor de hidrólisis.

Tabla 36-3: Dimensiones de las partes del reactor con su sistema de agitación

D_{TF} (m)	D_{AF} (m)	H_F (m)	R_F (m)	E_F (m)	W_F (m)	B_F (m)
1.7905	0.7162	1.6115	0.0249	0.2387	0.1432	0.2506

Realizador por: Medina, Juan, 2022.

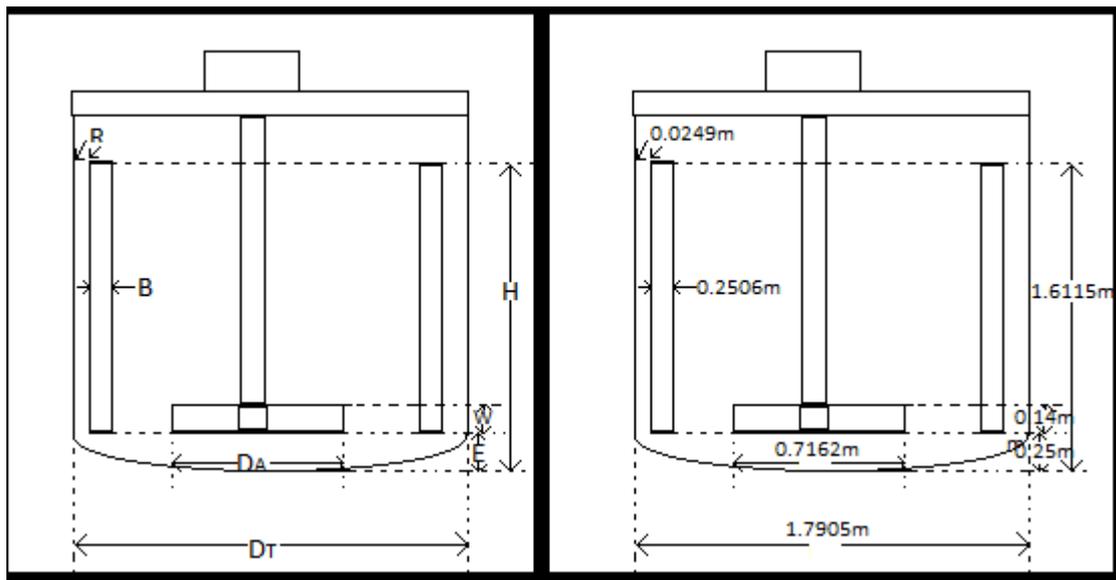


Ilustración 3-3: Diseño del biorreactor con sus respectivas partes

Realizado por: Medina, Juan, 2022.

3.7.5.8. Cálculo del número de Reynolds del biorreactor para la hidrólisis

Según (Dewangan y Saha 2021) la viscosidad de una mezcla entre un líquido y el aserrín en una proporción 1:20 es de $2.131 \times 10^{-3} \frac{kg}{ms}$. También nos indica la densidad que toma un valor de $487 \frac{kg}{m^3}$

$$Re = \frac{D_A^2 * N * \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{(0.7162m)^2 * 1 \frac{rev}{s} * 487 \frac{kg}{m^3}}{2.131 \times 10^{-3} \frac{kg}{ms}}$$

$$Re = 117223.3544$$

Como el Número de Reynolds es mayor a 4000, decimos que el flujo es turbulento en la etapa de pretratamiento.

3.7.5.9. Cálculo de la potencia que necesita el sistema de agitación

$$P = N_p * D_A^5 * N^3 * \rho$$

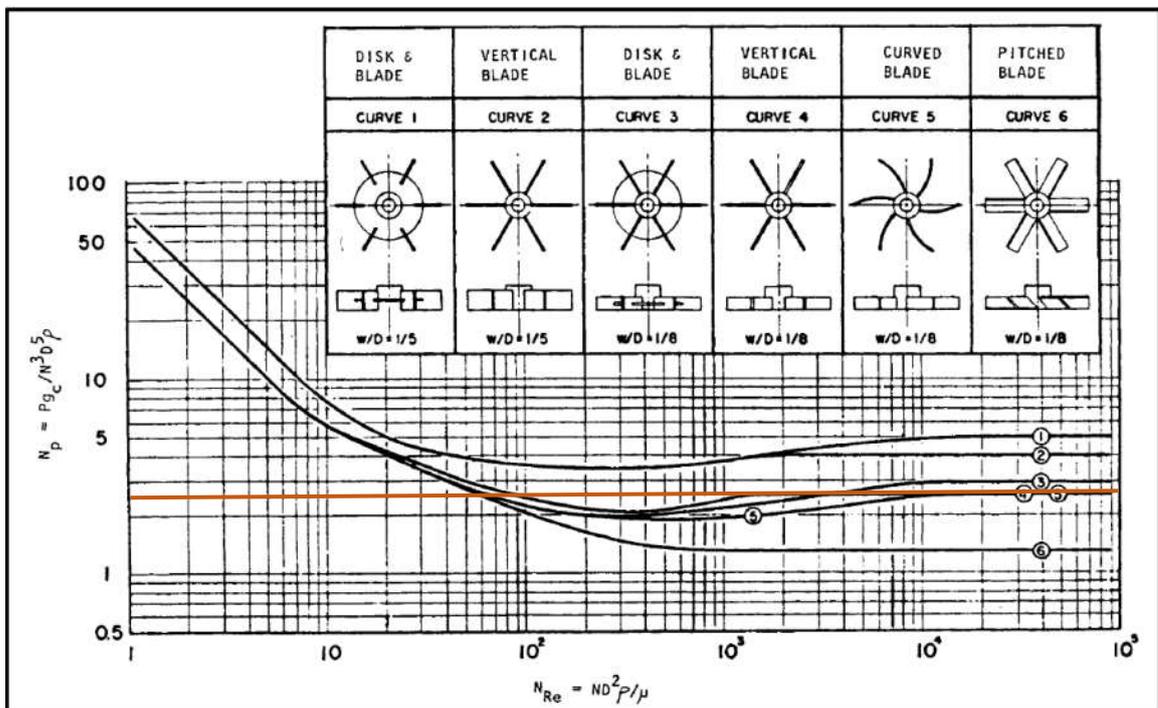


Ilustración 2-3: Número de Reynolds vs Número de potencia para tipos de agitadores tipo turbina

Fuente: Walas, 1990; citado en Ricaurte, 2016.

El número de potencia para este diseño de agitador de tipo turbina Vertical Blade para el reactor de pretratamiento viene dada por la tabla, tomando el valor de 2.5.

$$P = 2.5 * (0.7162m)^5 * \left(1 \frac{rev}{s}\right)^3 * 487 \frac{kg}{m^3}$$

$$P = 229.4249W$$

$$P = 0.3076HP$$

3.7.5.10. Potencia real necesaria para el sistema de agitación en el biorreactor

En realidad, la eficiencia no es del 100% por lo que se requiere una mayor potencia

$$PF_{real} = \frac{PF}{n}$$

$$PF_{real} = \frac{0.3076HP}{0.80}$$

$$PF_{real} = 0.3845HP$$

3.7.5.11. Tiempo de agitación en el biorreactor

$$t_{aP} = \frac{5.20 * D_T^2}{N_p^{\frac{1}{3}} * N * D_A^2}$$

$$t_{aP} = \frac{5.20 * (1.7905m)^2}{(2.5)^{\frac{1}{3}} * \left(1 \frac{rev}{s}\right) * (0.7162m)^2}$$

$$t_{aP} = 23.9462 s$$

El tiempo de agitación para alcanzar la mezcla homogénea de un 95% entre la solución ácida y el aserrín es 23.94s.

3.7.5.12. Sistema de calentamiento

En la hidrólisis enzimática se recomienda una temperatura de $45^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ para que el hongo *Trichoderma reesei* pueda generar las enzimas necesarias para el proceso.

El sistema de calentamiento a diseñar es el de enchaquetado o chaqueta de calentamiento, se lo ha elegido por su costo económico y facilidad de mantenimiento frente a otros sistemas como serpentín o resistencias.

- *Diámetro de la chaqueta de calentamiento*

$$D_C = D_{TF} + 0.1 * D_{TF}$$

$$D_C = 1.7905m + 0.1 * 1.7905m$$

$$D_C = 1.9696m$$

- *Espesor de la chaqueta de calentamiento*

$$E_C = D_C - D_{TF}$$

$$E_C = 1.9696m - 1.7905m$$

$$E_C = 0.1791m$$

- *Altura de la chaqueta de calentamiento*

$$h_c = h_{Thidrolisis} + E_C$$

$$h_c = 2.0759m + 0.1791m$$

$$h_c = 2.2549m$$

- *Volumen de la chaqueta de calentamiento*

$$V_C = \pi * \left(\frac{D_C}{2}\right)^2 * h_c - \pi * \left(\frac{D_T}{2}\right)^2 * h_{Thidrolisis}$$

$$V_C = \pi * \left(\frac{1.9696m}{2}\right)^2 * 2.2549m - \pi * \left(\frac{1.7905m}{2}\right)^2 * 2.0759m$$

$$V_C = 1.6433m^3$$

- *Calor necesario en la chaqueta de calentamiento*

$$Qch = m * Cpj * \Delta T$$

Con la ayuda de (Casanova, Solís y Carrillo 2017) se puede saber el valor del calor específico de la mezcla aserrín agua que se utilizó en el presente proyecto.

$$Cpj = 4.316 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

Esperando que la temperatura máxima en este proceso sea 50°C

$$Qch = 2122.6551kg * 4.316 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (50^{\circ}C - 15^{\circ}C)$$

$$Qch = 320648.279405 kJ$$

3.7.5.13. Cantidad estimada de azúcares fermentables después de la hidrólisis

$$V_{\text{azúcares}} = \frac{\% \text{rendimiento} * V_{\text{hidrólisis}}}{100}$$

$$V_{\text{azúcares}} = \frac{92.85\% * 4.5453 \text{m}^3}{100} * \frac{1000 \text{l}}{1 \text{m}^3}$$

$$V_{\text{azúcares}} = 4220.3112 \text{ litros/lote}$$

3.8. Equipos adicionales

3.8.1. Báscula de suelo

Tabla 37-3: Características de báscula de suelo recomendada

Detalle	Equipo
Marca	INTEL WEIGHING
Modelo	FS-M1515
Dimensiones (mm)	1500 x 1500
Capacidad (kg)	300-5000
Material	Acero inoxidable
Precio (\$)	300

Fuente: Alibaba.com, 2023b.

3.8.2. Refractómetro

Tabla 38-3: Características del refractómetro recomendado

Detalles	Equipo
Fabricante	PCE
Modelo	PCE-DRC 2
Compensación de temperatura (°C)	10-40
Valor de medición	Aprox. 1 s
Tamaño de la muestra (gotas)	4 – 5
Porta muestra	Anillo de acero inoxidable con prisma de cristal
Carcasa	ABS, IP 65
Batería	1 x 1.5 V AAA
Dimensiones (mm)	121 x 58 x 25

Precio (\$)	336.21
Precisión	
Contenido de azúcar	± 0.2 %
Índice de refracción (nD)	0.0003
Temperatura (°C)	0.1

Fuente: Alibaba.com, 2023c.

3.8.3. pHmetro

Tabla 39-3: Características del pHmetro recomendado

Detalles	Equipo
Modelo	EZ9902
Marca	HEDAO
Peso (g)	90
Dimensiones (mm)	183 x 37 x37
Precisión	± 0.1 pH
Batería (V)	3*1.5
Precio (\$)	23

Fuente: Alibaba.com, 2023d.

3.9. Análisis costo-beneficio

3.9.1. Costos variables

Tabla 40-3: Costo de aditivos, materia prima e insumos para producir 4000L de azúcares fermentables

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo total
Aserrín	500	Kg	---	10.00\$
Ácido sulfúrico	32	L	1.25	40.00\$
Agua potable	5	m ³	1	5.00\$
Enzima	1x10 ⁷	L	120\$	0.10\$
Tanque de almacenamiento (1300L)	3	Unidad	288\$	864.00\$
Total				919.10\$

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

Tabla 41-3: Costos variables de producción al mes

Descripción	Días trabajados	Producción mensual esperada	Costo por litro (\$)	Costo Total (\$)
Litros a producir	20	4000L	0.23	919.10

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

Tabla 42-3: Otros costos variables a tener en cuenta

Descripción	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Operario	2	460	920
Total			920

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

3.9.2. Costos fijos

Tabla 43-3: Costos fijos del proceso de producción al mes

Descripción	Costo (\$)
Transporte (Combustible)	400.00
Servicios básicos (Agua, luz)	200.00
Total	600.00

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

3.9.3. Precio de producción de los azúcares fermentables

$$P_p = \frac{C_{\text{fijos de producción al mes}} + C_{\text{variables producción al mes}} + C_{\text{otros variables}}}{\text{Litros de producción al mes}}$$

$$P_p = \frac{600 + 919.10 + 920}{4000 L}$$

$$P_p = 0.61 \frac{\$}{L}$$

3.9.4. Precio de venta de los azúcares fermentables

El precio de venta de los azúcares fermentables con 10°Brix es la mitad de precio de venta de jugo de caña, es decir, \$1. Para que sea competitivo generando utilidad.

3.9.5. Punto de equilibrio mensual y anual

A partir de estos puntos de equilibrio se empezará a ganar.

Tabla 44-3: Punto de equilibrio mensual y anual

Detalle	Mensual	Anual
Costo fijo	600	7200
Precio de venta	1	1
Costo variable unitario	0.61	0.61
Punto de equilibrio	1538.46	18461.54

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

3.9.6. Maquinarias y equipos

Tabla 45-3: Costos, depreciación, mantenimiento y seguro de maquinarias y equipos

Maquinarias y equipos	Valor	Vida útil (Años)	Inversiones		Mantenimiento (5%)	Seguro (3%)
			Depreciación (%)	Valor (\$)		
Báscula de suelo	300.00	5	20.00	60.00	15.00	9.00
Refractómetro	336.21	5	20.00	67.24	16.81	10.09
pHmetro	23.00	5	20.00	4.46	1.15	0.69
Molino de aserrín	3000.00	5	20.00	600	150.00	90.00
Tamiz de aserrín	860.00	5	20.00	172.00	43.00	25.80
Equipo de pretratamiento	5000.00	5	20.00	1000.00	250.00	150.00
Equipo de hidrólisis	6000.00	5	20.00	1200.00	300.00	180.00
Total	15519.21			3103.7	775.96	465.58

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

3.9.7. Proyección de ventas y su presupuesto

Tabla 46-3: Proyección de ventas y su presupuesto

Producto	Azúcares fermentables 10.2°Brix	
Precio de venta	1	
Tasa de crecimiento poblacional	1.56%	
Producción diaria	Producción mensual	Producción anual
200	4000	48000
Años	Proyección de demanda	Presupuesto de ventas
Año 1	48000	48000.00
Año 2	48748.8	48748.80
Año 3	49509.28	49509.28
Año 4	50281.62	50281.62
Año 5	51066.01	51066.01

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

3.9.8. Proyección de costo y su presupuesto

Tabla 47-3: Proyección de costos y su presupuesto

Flujo de inflación	0.0017%					
Detalle	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costos de producción						
Materia prima directa	11029.2	11029.38	11029.56	11029.75	11029.94	11030.13
Mano de obra directa	11040	11040.18	11040.37	11040.56	11040.75	11040.93
Mantenimiento y seguros	15519.21	15519.47	15519.73	15519.99	15520.26	15520.52
Depreciación	3103.7	3103.75	3103.80	3103.85	3103.91	3103.96
Subtotal	40692.11	40692.80	40693.49	40694.18	40694.87	40695.56
Costos administrativos						
Servicios básicos	2400	2400.04	2400.08	2400.12	2400.16	2400.20
Impuestos / permisos de funcionamiento	146.40	146.40	146.40	146.41	146.41	146.41
Subtotal	2546.40	2546.44	2546.48	2546.53	2546.57	2546.61
Costos de ventas						
Transporte	4800	4800.08	4800.16	4800.24	4800.33	4800.41
Subtotal	4800	4800.08	4800.16	4800.24	4800.33	4800.41
Costos financieros						
Intereses bancarios	100	100	100	100.01	100.01	100.01
Subtotal	100	100	100	100.01	100.01	100.01
Total	48138.51	48139.24	48140.13	48140.96	48141.78	48142.59

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

3.9.9. Flujo de caja

Tabla 48-3: Flujo de caja

-----	-----	-----	Años				
			0	1	2	3	4
+	Ventas netas		48000.00	48748.80	49509.28	50281.62	51066.01
-	Costos de producción		48138.51	48139.24	48140.13	48140.96	48141.78
=	Utilidad antes de reparto		138.51	609.56	1369.15	2140.66	2924.23
-	Reparto de utilidades (15%)		20.77	91.43	205.37	321.09	438.34
=	Utilidad antes de impuestos		117.74	518.13	1163.78	1819.57	2485.89
-	Impuestos a la renta		0.00	0.00	0.00	0.00	42.08
=	Utilidad neta		117.74	518.13	1163.78	1819.57	2443.81
-	Inversión de máquinas y equipos	-15519.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
=	Flujo de caja	-15519.21	117.74	518.13	1163.78	1819.57	2443.81
=	Flujo de caja actualizada 11,50%	-15519.21	133.04	585.45	1315.00	2056.00	2761.36
=	Flujo de caja acumulada	-15519.21	-15386.17	-14801.04	-13486.04	-11430.04	-8668.68

Tasa de rendimiento del mercado	11.50
VAN (Valor actual neto)	2443.81
TIR (Tasa interna de retorno)	13%
PR (Plazo de recuperación)	7.22

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

El VAN es positivo, $2443.81 > 0$, por lo tanto, el proyecto es totalmente viable, con una recuperación aproximadamente de 7 años con 2 meses y 13 días y un TIR de 13%.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Resultados

4.1.1. Caracterización de la materia prima

Tabla 1-4: Resultados de la caracterización de la materia prima (Aserrín)

Parámetro	Resultado	Datos de bibliografía
Humedad (%)	19.80	...
Cenizas (%)	0.795	0.51-0.81
Lignina de Klason (%)	20.5228	...
Celulosa (%)	43.24	37.25

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

4.1.2. Caracterización de los azúcares fermentables

Tabla 2-4: Resultados de la caracterización de los azúcares fermentables

Parámetro	Unidades	Resultado	Rango bibliografía
Sólidos totales	g/100ml	7.3488	4.78 – 10.4
Cenizas totales	%	0.075	0.05 – 0.08
pH	...	4.85	4.6 – 4.8
Densidad	g/ml	0.9011	...
Índice de refracción	...	1.33435	...
Brix	°Bx	10.2	11.3 – 22.7
Temperatura	°C	20	...

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

4.1.3. Rendimiento de los procesos en laboratorio

Tabla 3-4: Resultados de los procesos en laboratorio

Proceso	Rendimiento
Molienda	97.42 %
Tamizado	40.57 %
Hidrólisis	92.85 %
Obtención de azúcares a partir de celulosa	68.26 %

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

4.1.4. Dimensionamiento de los equipos

Tabla 4-4: Resultado del dimensionamiento de los equipos

Báscula de suelo	
Capacidad máxima (kg)	5000
Dimensiones (mm)	1500 x 1500
Material	Acero inoxidable
Molino de aserrín	
Capacidad a procesar (kg/lote)	500
Productividad (kg/h)	907
Voltaje (V)	380
Revoluciones por minuto	3600
Dimensiones (mm)	2250 x 1360 x 2800
Material	Acero inoxidable
pHmetro	
Peso (g)	90
Dimensiones (mm)	183*37*37
Precisión	±0.1
Batería (V)	3*1.5
Refractómetro	
Compensación de temperatura (°C)	10 - 40
Valor de medición	Aprox. 1s
Tamaño de la muestra (gotas)	4 - 5
Precisión en contenido de azúcar	± 0.2%
Precisión en índice de refracción (nD)	0.0003
Precisión en temperatura (°C)	0.1
Tamiz	
Capacidad (t/h)	0.05 - 5
Granularidad (mm)	0.125 – 0.063
Voltaje (V)	220 - 380
Dimensiones (mm)	2199 x 808 x 878
Recipiente de recepción	
Capacidad a procesar (kg/lote)	500
Volumen total del recipiente (m ³)	2.875
Material	Acero Inoxidable

Equipo de pretratamiento	
Cantidad a procesar (kg/lote)	197.62
Volumen total del reactor (m ³)	2.273
Diámetro total del reactor (m)	1.421
Altura total del reactor (m)	1.6482
Tipo de agitador	Vertical Blade
Potencia real para la agitación (HP)	0.2732
Tiempo de agitación (s)	20.4737
Diámetro de la chaqueta de calentamiento (m)	1.8473
Volumen de la chaqueta de calentamiento (m ³)	2.9462
Calor necesario (kJ)	329274.5082
Equipo de hidrólisis	
Cantidad a procesar (kg/lote)	197.62
Volumen total del reactor (m ³)	4.5453
Diámetro total del reactor (m)	1.7905
Altura total del reactor (m)	2.0759
Tipo de agitador	Curved Blade
Potencia real para la agitación (HP)	0.3845
Tiempo de agitación (s)	23.9462
Diámetro de la chaqueta de calentamiento (m)	2.3776
Volumen de la chaqueta de calentamiento (m ³)	5.8920
Calor necesario (kJ)	320648.279405

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

4.1.5. Análisis costo-beneficio

Tabla 5-4: Resultado del análisis costo-beneficio

Detalle	Resultado
Precio de producción del litro de azúcares fermentables	0.61 \$/L

Realizado por: Medina, Juan, 2023.

4.2. Análisis y discusión de resultados

- Caracterización de la materia prima

La caracterización de la materia prima se llevó a cabo en el aserrín molido y tamizado debido a que de este depende el rendimiento de la hidrólisis. Al no existir una norma determinada para caracterizar el aserrín se siguió los procedimientos de Laboratorio de Investigación. Además, existen diversas investigaciones (Dagnino et al. 2014), (Guevara et al. 2012), (Rodríguez et al. 2017) y (Balat 2011) que han caracterizado una parte de la gran cantidad de biomasa lignocelulósica existente permitiendo establecer un rango entre los parámetros encontrados, cenizas, contenido de lignina insoluble y humedad.

Los resultados de la caracterización de la materia prima a una temperatura de 20°C fueron 19.80 % de humedad; 0.795 cenizas totales, 20.5228 % de lignina insoluble y 43.24% de celulosa. Dichos valores se encontraron dentro del rango bibliográfico. En los trabajos antes mencionados se analizó la lignina insoluble en ácido. Sin embargo, este análisis se llevó a cabo en cascarilla de arroz que tiene un bajo contenido de lignina comparado con la lignina del aserrín. De todos modos, el contenido de lignina insoluble de aserrín se encuentra dentro de los rangos previstos.

- Proceso de obtención de azúcares fermentables en laboratorio

En el proceso de laboratorio se obtuvo 94.8054ml de azúcares fermentables, con una medida de 10.2°Bx, a partir de 31.1384g de aserrín. En (Cajas y Javier 2013) se menciona que obtuvieron 50ml de azúcares fermentables a partir de 10g de materia prima con una medida de 19°Bx, es decir que tuvo un rendimiento mayor. La diferencia es significativa, esto puede ser porque se utilizó diferente materia prima y en diferentes proporciones respecto a la solución enzimática. También se puede deber al diferente proceso que se utilizó ya que en trabajo anteriormente citado la materia prima es pretratada 2 veces antes de la hidrólisis. Sin embargo, se espera que el rendimiento del proceso industrial sea mayor ya que el rendimiento de proceso en el laboratorio pudo verse

afectado por varios factores que menoran la obtención de azúcares fermentables. El rendimiento total del proceso de obtención de azúcares fermentables es de 23.5892% que nos muestra los gramos de azúcares obtenidos a partir de 100 gramos de celulosa contenida en el aserrín.

- **Caracterización de los azúcares fermentables obtenidos**

Para la caracterización de la materia prima se siguió los procedimientos indicados por el Laboratorio de Investigación. Además, al no existir una norma que rija la caracterización de azúcares fermentables, existen diversas investigaciones (Cajas y Javier 2013), (Dagnino et al. 2014) y (Rodríguez et al. 2017) que han caracterizado los azúcares reductores obtenidos de una gran variedad de materia prima lignocelulósica permitiendo establecer un rango entre los parámetros que se han encontrado, siendo sólidos y cenizas totales, densidad, pH, índice de refracción, grados Brix y temperatura. Los datos de la caracterización de la materia prima a una temperatura de 20°C fueron 7.3488g/100ml de sólidos totales; 0.075% de cenizas totales; 4.85 de pH; 0.9011g/ml de densidad; 1.33435 de índice de refracción y 10.2°Bx. Dichos valores se encuentran dentro del rango bibliográfico antes mencionado a excepción de los grados Brix que es mucho más bajo que 19.98°Bx encontrado bibliográficamente. La baja medición en los grados Brix se puede deber a la cantidad de materia prima tratada con la solución enzimática ya que según la bibliografía antes mencionada utilizan mayor cantidad de materia prima para una misma cantidad de solución enzimática. Además, el bajo rendimiento en la obtención de azúcares fermentables se puede deber a la materia prima utilizada ya que en (Dagnino et al. 2014) se utiliza cascarilla de arroz como materia prima.

CONCLUSIONES

- Se diseñó un proceso industrial para la obtención de azúcares fermentables a partir de aserrín de madera de ciprés (*Cupressus lusitánica miller*) mediante hidrólisis enzimática. Con los siguientes procesos para llevar a cabo esta transformación molienda, tamizado, pretratamiento ácido e hidrólisis con la enzima *Trichoderma reesei*.
- Se realizó un pretratamiento ácido con H₂SO₄ al 3% v/v a 95°C durante 2h para un óptimo rendimiento en la obtención de los azúcares fermentables.
- Se estableció las variables del proceso para la obtención de azúcares fermentables a nivel industrial a partir de los datos conseguidos a nivel de laboratorio. Estas fueron el tiempo en la molienda que es de 10 minutos, el tiempo de tamizado que fue de 5 minutos y en la hidrólisis fue la concentración de la enzima *Trichoderma reesei* que fue de 1X10⁷UFC/ml.
- Se caracterizó los azúcares fermentables obtenidos mediante hidrólisis enzimática determinando los grados Brix que tuvieron un valor de 10.2°. A pesar de que los grados Brix no fueron los reportados por la bibliografía, se considera que los azúcares fermentables son aptos para su comercialización.
- Se calculó el rendimiento total del proceso de obtención de azúcares fermentables a partir de la celulosa contenida en el aserrín obteniendo un 68.26%, respecto a la masa de celulosa del aserrín utilizado.

RECOMENDACIONES

- El aserrín puede secarse a la intemperie por un par de días para menorar su humedad y de este modo mejorar los procesos de molienda y tamizado. También ayudara a disminuir el peso la materia prima.
- El proceso de pretratamiento ácido es sumamente necesario para que se dé una hidrólisis con un alto rendimiento de azúcares fermentables, por lo que se recomienda algún otro tipo de pretratamiento adicional que pueda ser incluido y aumente la producción de azúcares.
- La hidrólisis debe llevarse a cabo en las condiciones apropiadas para que exista la cantidad adecuada de enzimas para unirse al sustrato y catalizar la reacción, por lo que se recomienda tener muy en cuenta la concentración del hongo *Trichoderma reesei*, la temperatura, el tiempo y el pH para un proceso eficiente.
- Para que la hidrólisis enzimática tenga un mayor rendimiento es recomendable usar enzimas adicionales que ayuden a este proceso como la hidrolasa, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILERA, M. & RAMÍREZ, D.** Diseño de un biorreactor a escala de laboratorio y su sistema de control [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayas, Ecuador. 2017. pp. 156 [Consulta: 12 enero 2023]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/38970/D-CD88514.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- AKHABUE, C., et al.** “Effect of dilute acid pre-treatment on the functional complexes and surface morphology of wood sawdust for bioethanol production”. *18th annual International Materials Congress for the Materials Society of Nigeria (MSN)*, 2019, (Nigeria) pp. 318-322.
- ALIBABA.COM.** *Molino de aserrín.* [en línea]. 2022. Disponible en: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Corn-1600067326470.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.12491326RrRYBB
- ALIBABA.COM.** *Tamiz de aserrín.* [en línea]. 2022. Disponible en: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Micronized-62252765441.html?spm=a2700.galleryofferlist_catalog.normal_offer.d_title.31512651TI1IPU
- ALIBABA.COM.** *Báscula de suelo.* [en línea]. 2022. Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/1-2-1-2m-2-ton-floor-weighing-scale62050387482.html?spm=a2700.md_es_ES.deiletai6.1.65fd32bb32BFYp
- ALIBABA.COM.** *Refractómetro.* [en línea]. 2022. Disponible en: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Portable-60619217972.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.aa2c35e4OPE1Ro
- ALIBABA.COM.** *Medidor de pH EC digital de calidad alemana.* [en línea]. 2022. Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/germany-quality-digital-ph-ec-meter1600119837862.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.2e5344f0uLdKVz&s=p
- BALAT, M.** “Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review”. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2011, 52(2), pp. 858-875. [Consulta: 09 diciembre 2022]. ISSN 0196-8904. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410003791>
- CAJAS, E. & JAVIER, F.** Obtención de etanol mediante hidrólisis alcalina, enzimática y fermentación a partir del excedente orgánico del banano variedad Musa Paradisíaca [En línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Quito-Ecuador, 2013. [Consulta: 12 enero 2023]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1821>
- CASANOVA, P., SOLÍS, K. & CARRILLO, T.** “Propiedades térmicas y fisicoquímicas de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos de aserradero”. *Ingeniería* [en línea], 2017, 27(1), pp. 57-74. [Consulta: 8 enero 2023]. ISSN 2215-2652. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/25852/32314>
- CHAVES, E. & FONSECA, W.** “Ciprés, *Cupressus lusitanica* Miller: especie de árbol de uso múltiple en América Central”. *CATIE* [en línea], 1991. [Consulta: 11 junio 2022]. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/783>

- DAGNINO, E., et al.** “Obtención de bietanol a partir de la celulosa presente en cascarilla de arroz y aserrín de algarrobo”. *Avances en energías renovables y medio ambiente* [En línea], 2014, (Argentina) vol. 18, [Consulta: 12 enero 2023]. ISSN 2314-1433. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/138979/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- DE ALMEIDA, C., et al.** “Applicability evaluation of *Cupressus lusitanica* for pulp production”. *Maderas. Ciencia y tecnología* [en línea], 2016, 18(4), pp. 651-662. [Consulta: 7 junio 2022]. ISSN 0718-221X. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2016000400013&lng=es&nrm=iso&tlng=e
- DEWANGAN, G.P. & SAHA, S.N.** “Fluidization characteristics of sawdust in a cold flow fluidized bed”. *Journal of the Indian Chemical Society* [En línea], 2021, 98(12), pp. 100235. ISSN 0019-4522. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019452221002351>
- DÍAZ RENDÓN, J.** Simulación del proceso de obtención de azúcares fermentables a partir del hidrolizado de bagazo de caña de azúcar para la producción de xilitol [En línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Universidad de los Andes, Colombia. 2020. [Consulta: 6 enero 2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/51642>
- ESPINOSA NEGRÍN, A.M., et al.** “PRETRATAMIENTO DE BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS: BREVE REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS UTILIZADOS”. *Centro Azúcar* [en línea], 2021, 48(3), pp. 108-119. [Consulta: 11 junio 2022]. ISSN 2223-4861. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612021000300108&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- GOOGLE EARTH.** *Ubicación de los lugares del proyecto* [en línea]. [Consulta: 6 enero 2023]. Disponible en: <https://earth.google.com/web>.
- GRACIDA RODRÍGUEZ, J.N. & PÉREZ-DÍAZ, B.** “Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar”. *Revista internacional de contaminación ambiental* [en línea], 2014, 30(2), pp. 213-227. ISSN 0188-4999. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- GUEVARA, C.A., et al.** “Obtención de Etanol y Biogás a Partir de Banano de Rechazo”. *Información tecnológica* [en línea], 2012, 23(2), pp. 19-30. [Consulta: 6 enero 2023]. ISSN 0718-0764. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000200004&lng=en&nrm=iso&tlng=en.
- HANCOCK, D.G., et al.** “Wood dust exposure and lung cancer risk: a meta-analysis”. *Occupational and Environmental Medicine* [en línea], 2015, 72(12), pp. 889. DOI 10.1136/oemed-2014-102722. Disponible en: <http://oem.bmj.com/content/72/12/889.abstract>.
- LADIO, A.** “La potencialidad de los bosques de ciprés como proveedores de recursos forestales no maderables”. *Patagonia Forestal* [en línea], 2022, (Argentina) 12(2), pp. 17. [Consulta: 12 enero 2023]. Disponible en: https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=22014&articulos=yes&etalles=yes&art_id=32112

- LIMING, X. & XUELIANG, S.** “High-yield cellulase production by *Trichoderma reesei* ZU-02 on corn cob residue”. *Bioresource Technology* [en línea], 2004, 91(3), pp. 259-262. [Consulta: 12 enero 2023]. ISSN 0960-8524. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852403001950>
- MARGEOT, A., et al.** “New improvements for lignocellulosic ethanol”. *Current Opinion in Biotechnology* [en línea], 2009, 20(3), pp. 372-380. [Consulta: 12 enero 2023]. ISSN 0958-1669. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166909000652>
- PETIT-ALDANA, J., et al.** “BEHAVIOR OF MEXICAN CYPRESS (*Cupressus lusitánica* Mill.) FOR CHRISTMAS TREE PRODUCTION UNDER ANDEAN HIGH CLIMATE ENVIRONMENT, VENEZUELA”. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* [en línea], 2010, 16(1), pp. 13-19. [Consulta: 11 junio 2022]. ISSN 20073828. Disponible en: <https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=63&articulo=661>.
- RICAUURTE, L.E.** Diseño y simulación de un tanque mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayas, Ecuador. 2016. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/36620>.
- RODRÍGUEZ, M.D., et al.** “OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES A PARTIR DE ASERRÍN DE PINO PRETRATADO SECUENCIALMENTE CON ÁCIDO-BASE”. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea], 2017, 33(2), pp. 317-324. [Consulta: 6 enero 2023]. ISSN 01884999. Disponible en: <http://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.02.12/46665>.
- SÁNCHEZ, A.M., et al.** *SECTOR MADERERO ECUADOR PANORAMA GENERAL* [blog]. 2017. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://blogs.cedia.org.ec/obest/wp-content/uploads/sites/7/2020/06/Sector-maderero-Ecuador-aprobado.pdf>.
- SERRET-GUASCH NURIAN, et al.** “Caracterización de aserrín de diferentes maderas”. *SciELO* [en línea]. 2016. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012.
- WATT, M.S., et al.** “Predicting the spatial distribution of *Cupressus lusitánica* productivity in New Zealand”. *Forest Ecology and Management* [en línea], 2009, 258(3), pp. 217-223. [Consulta: 27 abril 2022]. ISSN 0378-1127. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112709002679>
- WORSTELL, J.** “Batch and semi-batch reactors: practical guides in chemical engineering”. *Butterworth-Heinemann* [En línea], 2015 (Massachusetts-USA) pp. 7-30. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: <https://www.perlego.com/book/1814477/batch-and-semibatch-reactors-practical-guides-in-chemical-engineering-pdf>

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERIZACIÓN DEL ASERRÍN

a)



b)



c)



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	<p align="center"> ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: Juan Omar Medina Caicedo </p>	TEMA		
a) Determinación de humedad. b) Determinación de cenizas. c) Determinación de celulosa.	X APROBADO POR APROBAR POR CALIFICAR POR VERIFICAR		DISEÑO DE UN PROCESO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES A PARTIR DE ASERRÍN DE MADERA DE CIPRÉS (Cupressus lusitánica miller) MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA	ESCALA 1:1	FECHA 20/03/2023

ANEXO B: ELABORACIÓN DE LOS AZÚCARES FERMENTABLES

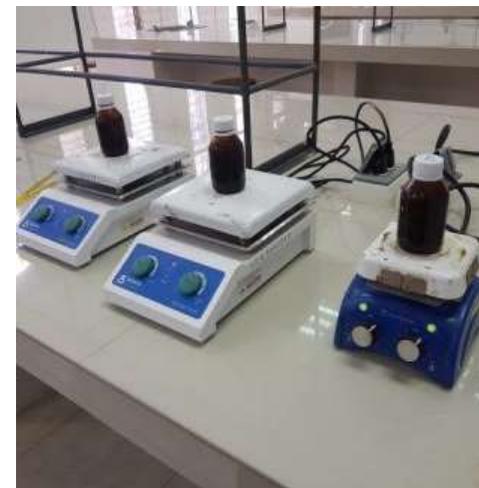
a)



b)



c)



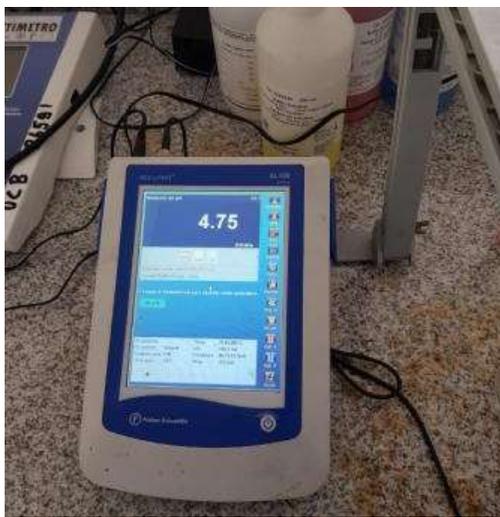
NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	<p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</p> <p>REALIZADO POR: Juan Omar Medina Caicedo</p>	TEMA							
a) Tamizado del aserrín. b) Tratamiento químico. c) Hidrólisis enzimática.	X APROBADO POR APROBAR POR CALIFICAR POR VERIFICAR		DISEÑO DE UN PROCESO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES A PARTIR DE ASERRÍN DE MADERA DE CIPRÉS (<i>Cupressus lusitánica miller</i>) MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA							
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">ESCALA</td> <td style="width: 33%;">FECHA</td> <td style="width: 33%;">LÁMINA</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1:1</td> <td style="text-align: center;">20/03/2023</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> </table>			ESCALA	FECHA	LÁMINA	1:1	20/03/2023	1
ESCALA	FECHA	LÁMINA								
1:1	20/03/2023	1								

ANEXO C: CARACTERIZACIÓN DE LOS AZÚCARES FERMENTABLES

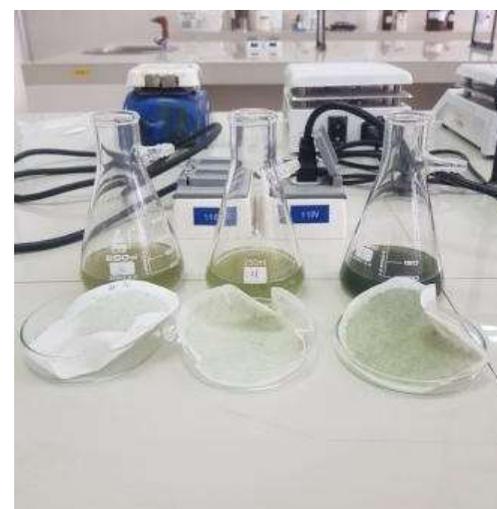
a)



b)



c)



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	<p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</p> <p>REALIZADO POR: Juan Omar Medina Caicedo</p>	TEMA		
<p>a) Determinación de °Brix. b) Determinación del pH. c) Separación de los azúcares.</p>	<p>X APROBADO POR APROBAR POR CALIFICAR POR VERIFICAR</p>		<p>DISEÑO DE UN PROCESO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES A PARTIR DE ASERRÍN DE MADERA DE CIPRÉS (<i>Cupressus lusitánica miller</i>) MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA</p>	<p>ESCALA 1:1</p>	<p>FECHA 20/03/2023</p>



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: 09 / 08 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Juan Omar Medina Caicedo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1368-DBRA-UPT-2023