

**PROPUESTA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOHIDRÓGENO POR FERMENTACIÓN  
OSCURA A PARTIR DE UN RESIDUO AGROINDUSTRIAL**

**DIANA LIZETH CADENA MARTINEZ**  
**WMAIDDY ALHIRIS CORDOBA ESPAÑA**

Proyecto integral de grado para obtener el título de  
**INGENIERO QUÍMICO**

Director

**HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA**

Ingeniero Químico

MsC. Ingeniería Química

PhD Energías renovables

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C.**

2022

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del presidente jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. Febrero del 2022

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

Consejero Institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dr. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretario general

**Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ**

Decana de Facultad Ingenierías

**Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO**

Director Programa de Ingeniería Química

**Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Las autoras expresan su agradecimiento a:

Harvey Andrés Milquez Sanabria, Ingeniero Químico y director del trabajo de grado, por sus aportes, orientación y conocimiento a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A todos nuestros profesores que a lo largo de la carrera nos brindaron todos sus conocimientos y experiencia.

A la Universidad de América por acogernos durante toda nuestra carrera y permitir nuestra formación como Ingenieras Químicas.

## **DEDICATORIA**

Dedicado a Dios, primeramente, quien guía cada uno de mis pasos y me permitió llegar a este paso importante en mi carrera, sin desfallecer.

A mi madre Yaned Cadena, que es mi gran motor e inspiración en la vida, por darme la oportunidad de estudiar a pesar de los obstáculos, quiero hoy expresar mi agradecimiento por su constante esfuerzo y dedicación que me permitieron llegar hasta donde estoy hoy. En mis manos está hacerla muy feliz y orgullosa de la persona en que me convertí. A Miguel Rodríguez quien ha sido un gran apoyo en nuestras vidas.

A mi gran amiga y compañera de tesis Alhiris Cordoba por su paciencia y apoyo incondicional a lo largo de la carrera, por sus ánimos cuando más lo necesitaba, valoro mucho la amistad que formamos y espero que continúe por muchos años. A las personas que conocí a lo largo de la carrera, que han estado tanto en los momentos buenos como en los malos, de igual manera a todos los que me apoyaron en este bello proceso.

**Diana Lizeth Cadena Martínez**

## **DEDICATORIA**

Agradeciéndole a Dios, quien me ha bendecido dándome la oportunidad de cumplir este gran logro, por ser el inspirador y la fortaleza que necesite para continuar con este proceso, por ser mi eterna compañía y guía.

Dedico este trabajo a mi madre Concepción España, quien con su amor, paciencia y esfuerzo me ha apoyado en todo el camino, por ser mi consejera, brindarme todos sus conocimientos y ayudarme a ser la persona que soy ahora.

A mi hermano Alejandro Cordoba por su cariño, presencia y por el apoyo moral que me brindo a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y me han dado la confianza que necesitaba para alcanzar con éxito las metas que me propongo.

**Wmaiddy Alhiris Cordoba España**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento, estos corresponden únicamente a las autoras.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>17</b>
1.1 Propiedades del hidrógeno	17
1.2 Aplicaciones del hidrógeno	17
<i>1.2.1 Procesamiento del petróleo</i>	18
<i>1.2.2 Producción petroquímica</i>	18
<i>1.2.3 Hidrogenación de aceites y grasas</i>	18
<i>1.2.4 Aplicaciones metalúrgicas</i>	19
<i>1.2.5 Industria electrónica</i>	19
<i>1.2.6 Hidrógeno como vector energético</i>	19
<i>1.2.7 Hidrógeno como combustible</i>	19
1.3 Producción de hidrógeno	20
<i>1.3.1 Reformado de vapor</i>	20
<i>1.3.2 Gasificación de carbón y biomasa</i>	20
<i>1.3.3 Electrólisis del agua</i>	20
<i>1.3.4 División termoquímica del agua y termólisis</i>	21
<i>1.3.5 División fotoelectroquímica del agua</i>	21
<i>1.3.6 Fotólisis directa</i>	21
<i>1.3.7 Fotólisis indirecta</i>	21
<i>1.3.8 Fotofermentación</i>	22
<i>1.3.9 Fermentación oscura</i>	22
1.4 Los inconvenientes del uso de hidrógeno	22
1.5 Producción de hidrógeno por fermentación oscura	23
1.6 Factores que afectan la producción de biohidrógeno por fermentación oscura	25
<i>1.6.1 Efecto del pH</i>	25
<i>1.6.2 Efecto de la temperatura</i>	25
<i>1.6.3 Efecto de la presión parcial del hidrógeno</i>	26

1.6.4 Efecto de los productos metabólicos solubles	27
1.6.5 Rol de los nutrientes	27
1.6.6 Rol de los iones metálicos	28
1.6.7 Efecto del tiempo retención hidráulica	28
<b>2. DETERMINACIÓN DEL RESIDUO AGROINDUSTRIAL A APROVECHARSE COMO SUSTRATO</b>	<b>29</b>
2.1 Industria arrocera	29
2.2 Industria de chocolates y derivados	30
2.3 Industria del azúcar	34
2.4 Industria de procesados de papa, plátano y yuca	37
2.4.1 Procesados de papa	37
2.4.2 Procesados de plátano	39
2.4.3 Procesados de yuca	42
2.5 Industria de lácteos	44
2.6 Industria cervecera	46
2.7 Industria del café	50
2.8 Matriz PUGH: selección del residuo agroindustrial	52
<b>3. SELECCIÓN DEL CONJUNTO DE MICROORGANISMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO</b>	<b>58</b>
3.1 Enterobacter aerogenes	59
3.2 Enterobacter cloacae	59
3.3 Escherichia coli	60
3.4 Clostridium butyricum	60
3.5 Clostridium pasteurianum	61
3.6 Clostridium beijerincki	61
3.7 Thermotoga neapolitana	62
3.8 Thermotoga maritima	62
3.9 Clostridium saccharoperbutylaceticum	62
3.10 Thermotoga elfii	63
3.11 Clostridium acetobutylicum	64
3.12 Clostridium thermocellum	64
3.13 Matriz PUGH: selección del microorganismo	65

<b>4. DISEÑO CONCEPTUAL PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR FERMENTACIÓN OSCURA</b>	<b>69</b>
4.1 Parámetros iniciales	69
4.2 Pretratamiento	72
4.2.1 <i>Lavado</i>	73
4.2.2 <i>Molienda</i>	75
4.2.3 <i>Hidrólisis</i>	77
4.3 Biorreactor	85
4.4 Separación, purificación	87
4.5 Almacenamiento	89
4.6 Balance de materia y energía	93
4.6.1 <i>Balance de materia</i>	93
4.6.2 <i>Balance de energía</i>	96
<b>5. ANÁLISIS</b>	<b>102</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>104</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>120</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Composición química de la cascarilla de arroz colombiana	30
Tabla 2. Composición química de la cáscara de la mazorca de cacao	31
Tabla 3. Composición química del mucilago de cacao	32
Tabla 4. Composición química de la cascarilla de cacao	33
Tabla 5. Producción aproximada de los residuos de la industria del cacao en el año 2018	34
Tabla 6. Composición química de la caña de azúcar	35
Tabla 7. Composición química y mineral de los subproductos de la caña de azúcar	36
Tabla 8. Aporte nutricional de papa fresca basado en 100g	38
Tabla 9. Composición química de la cáscara de papa	39
Tabla 10. Composición química del plátano	41
Tabla 11. Composición química de la cáscara de plátano	42
Tabla 12. Composición química de la yuca	43
Tabla 13. Composición química de la cáscara de yuca	44
Tabla 14. Composición química del lactosuero	46
Tabla 15. Composición química de la raicilla de malta	47
Tabla 16. Composición química del bagazo de cerveza	49
Tabla 17. Composición química de la pulpa de café	51
Tabla 18. Composición química del mucilago de café	52
Tabla 19. Numeración de los residuos agroindustriales	54
Tabla 20. Criterios de selección de los residuos agroindustriales	55
Tabla 21. Determinación del residuo agroindustrial	56
Tabla 22. Determinación final del residuo agroindustrial	56
Tabla 23. Listado de microorganismos	58
Tabla 24. Rendimiento de producción de hidrógeno de los microorganismos	65
Tabla 25. Criterios de selección del microorganismo	66
Tabla 26. Determinación del microorganismo	67
Tabla 27. Determinación final del microorganismo	70
Tabla 28. Características del microorganismo	71
Tabla 29. Parámetros, información y valoración para la selección del departamento	72

Tabla 30. Características del equipo de lavado	75
Tabla 31. Características del equipo de molienda	77
Tabla 32. Densidades de los componentes del cogollo de caña de azúcar	79
Tabla 33. Masa y volumen de los componentes del cogollo de caña de azúcar	81
Tabla 34. Proporciones básicas de una tanque agitado	83
Tabla 35. Dimensiones del tanque y el agitador	84
Tabla 36. Características del equipo de tanque agitado	85
Tabla 37. Características del biorreactor	87
Tabla 38. Características del equipo de almacenamiento	91
Tabla 39. Balance de materia	95
Tabla 40. Potencias requeridas por los equipos	96
Tabla 41. Capacidades caloríficas de los componentes	98
Tabla 42. Transferencia de calor y potencias de los compresores	100

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una propuesta para la producción de biohidrógeno empleando como sustrato un residuo de la agroindustria colombiana. Principalmente, se realizó una revisión bibliográfica de los residuos de las agroindustrias más representativas en Colombia, Para cada uno de los residuos se estableció la cantidad desechada, los carbohidratos presentes en estos y la relación C/N. Haciendo uso de la matriz PUGH se determinó que el residuo con el cual se va a llevar a cabo la producción de hidrógeno es el cogollo de caña de azúcar.

Posteriormente, se realizó una revisión bibliográfica sobre los microorganismos que producen hidrógeno, especificando para cada uno temperatura y pH óptimo de crecimiento, así como el rendimiento de producción de hidrógeno. Igualmente, para la selección del microorganismo, se hizo uso de la matriz PUGH obteniéndose como resultado que la *Enterobacter cloacae* es la bacteria con la cual se llevara a cabo la producción de hidrógeno.

Finalmente, para el diseño conceptual de la producción de hidrógeno, primero, se detallaron los parámetros iniciales con los cuales se hará la propuesta del proceso. Después, se estableció el proceso para el pretratamiento del residuo, que consiste en las operaciones de lavado, molienda e hidrolisis enzimática, seguido a esto realiza la fermentación oscura, el proceso de separación y purificación de hidrógeno, junto con el almacenamiento del mismo. Para cada etapa del proceso se realizó el respectivo dimensionamiento de los equipos teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento.

**Palabras claves:** Residuo agroindustrial, Microorganismos, Fermentación oscura, Biohidrógeno, Producción de hidrógeno.

## INTRODUCCIÓN

El hidrógeno verde es una alternativa de combustible usado en la actualidad para reducir el consumo de combustibles fósiles producidos a partir de fuentes no renovables que, a su vez, generan elevados niveles de contaminación, una forma de producción se puede basar en biotecnologías usando fuentes renovables.

A causa de los altos niveles de contaminación atmosférica y de una disminución en los recursos no renovables, se plantea la producción de hidrógeno con fines energéticos, teniendo que este actúa como un vector energético, es decir, aquel que almacena energía y en general, esta energía permite producir trabajo mecánico, calor y realizar el funcionamiento de procesos tanto físicos como químicos; además necesita de una fuente primaria de energía para su producción, en este caso biodegradables en donde por medio de un adecuado procesamiento para almacenarlo y darle el respectivo uso. [1]

Dentro de las ventajas de usar hidrógeno como vector energético están: al realizar combustión de este o al usarlo en pilas de combustible hay una generación de vapor de agua como subproducto lo cual evita la emisión de gases contaminantes o de efecto invernadero, otra ventaja es su alto poder calorífico en comparación a otros tipos de combustibles como el metano, gas natural y biodiesel y por último, la disponibilidad de materias primas para su obtención ya que se presentan diversas rutas para su producción. [1]

Por esta razón, la implementación de este combustible es uno de los más convenientes para mejorar la eficiencia energética y mejorar la conservación del medio ambiente. El hidrógeno ayudará a resolver los problemas de almacenamiento y transporte de energía que en el futuro tendrá el uso masivo de renovables, pero además durante un periodo de transición permitirá un uso más eficiente y menos contaminante de los combustibles fósiles. [2]

Teniendo en cuenta lo anterior, se planteó el presente proyecto de grado con el fin de establecer un diseño para la producción de hidrógeno a partir de residuos agroindustriales presentes en Colombia por medio de una fermentación oscura. De esta manera, se busca tener una alternativa de producción de energía limpia.

Para esto, se realizó una revisión de los diferentes residuos agroindustriales de Colombia, en donde se estableció sus diferentes características, cantidad generada para así determinar el residuo viable

para la producción, de igual manera una revisión bibliográfica para seleccionar el microorganismo según las características de este frente a la producción de hidrógeno reportada en la literatura. Por último, el diseño conceptual incluye el pretratamiento de la materia prima, la producción, almacenamiento y transporte con un alto grado de pureza.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Desarrollar una propuesta para la producción de biohidrógeno empleando como sustrato un residuo agroindustrial colombiano.

### **Objetivos específicos**

- Determinar un residuo de la industria colombiana que pueda aprovecharse como sustrato para la producción de biohidrógeno.
- Seleccionar un conjunto de microorganismos para metabolizar el sustrato seleccionado para la producción de hidrógeno, detallando las condiciones de operación del proceso para el crecimiento del microorganismo y la obtención de hidrógeno.
- Realizar el diseño conceptual para la producción de hidrógeno por fermentación oscura con el sustrato seleccionado, para su utilización como combustibles para automóviles.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Propiedades del hidrógeno

El hidrógeno es el número atómico 1 en la tabla periódica de los elementos, lo que significa que es el más simple y ligero. También es el elemento más abundante, suponiendo un 65% de la masa del universo. Debido a su reactividad, usualmente forma una molécula diatómica ( $H_2$ ) o compuestos con otros elementos. A temperatura y presión ambiente, existe como una molécula inodora e incolora, por su baja densidad (un cuarto de la del aire) se puede dispersar rápidamente cuando se libera al aire. Tiene una de las mayores densidades de energía por unidad de masa (entre 120 y 142 MJ/kg), y como tiene una energía de combustión por unidad de masa mayor que la de otros combustibles, ha llegado a ser de interés para la comunidad de energías renovables. [3]

Una de las mayores atracciones del hidrógeno es su presencia en el agua ( $H_2O$ ), la que cubre alrededor del 71% de la superficie de la Tierra. Si el hidrógeno puede liberarse del agua económicamente, podría ser el proveedor de energía del futuro y significaría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Uno de sus mayores elementos disuasorios es su inflamabilidad (la cual, por el lado positivo, da a entender que es buen combustible), ya que, mientras que los límites de inflamabilidad para un combustible como el gas natural están en el rango de 5,0% - 15% (relación peso-aire), el hidrógeno tiene un rango de 4,0% a 75,0%. Además, tiene una energía de ignición relativamente baja (0,02 mJ). [3]

La principal ventaja de usar hidrógeno para producir, por ejemplo, electricidad es que se convierte en agua por pilas de combustibles, lo que significa que no se considera un contaminante. Adicionalmente, no es tóxico y se disipa rápidamente cuando se libera. Tiene calificaciones NFPA, Asociación Nacional de Protección para Incendios, (de 0 a 4) de 0 para la salud, 4 para inflamabilidad y 0 por inestabilidad. [3]

### 1.2 Aplicaciones del hidrógeno

El mundo produce alrededor de 50 millones de toneladas de hidrógeno por año. Hasta hace poco (durante los últimos 100 años), los principales usos para el hidrógeno eran para la producción de fertilizantes y para el hidrocrackeo. Esto cambió con el advenimiento de la economía del

hidrógeno. Las personas están viendo el hidrógeno como un reemplazo para los combustibles fósiles, sin embargo, a continuación, se explica brevemente algunas de las aplicaciones más comunes del hidrógeno. [3]

### ***1.2.1 Procesamiento del petróleo***

En la industria del petróleo, el hidrógeno reacciona catalíticamente con hidrocarburos de muchas maneras. Estas incluyen hidrocraqueo e hidroprocesamiento. En el proceso de hidrocraqueo, el craqueo y la hidrogenación de hidrocarburos toman lugar simultáneamente para producir combustibles refinados con moléculas más pequeñas y mayores proporciones H/C (hidrógeno/carbono). En el hidroprocesamiento, el hidrógeno es usado para hidrogenar compuestos de sulfuro y nitrógeno y finalmente removerlos como H<sub>2</sub>S (sulfuro de hidrógeno) y NH<sub>3</sub> (amoníaco). [4]

### ***1.2.2 Producción petroquímica***

Muchos de los petroquímicos son producidos usando hidrógeno. El principal petroquímico producido con hidrógeno es el metanol. En la producción de metanol, el hidrógeno y el monóxido de carbono reaccionan sobre un catalizador a presiones y temperaturas altas. Otros usos del hidrógeno incluyen la producción de butiraldehído a partir de propileno por el proceso oxo; ácido acético a partir de gas de síntesis; butanediol y tetrahidrofurano a partir de anhídrido maleico; ciclohexano a partir de benceno, entre otros. [4]

Adicionalmente, el hidrógeno es una materia prima importante para la producción de amoníaco, ya que este es la columna vertebral de la industria de fertilizantes y es producido por la reacción entre nitrógeno e hidrógeno. El amoníaco consume sobre el 50% de todo el hidrógeno producido en el mundo. La reacción toma lugar a altas presiones. [4]

### ***1.2.3 Hidrogenación de aceites y grasas***

El hidrógeno ha sido usado extensamente para disminuir el grado de insaturaciones en aceites y grasa. Durante este proceso, varios cambios toman lugar e incluyen: un aumento en el punto de fusión y mayor resistencia a la oxidación que permite la preservación durante un periodo de tiempo más largo. [4]

#### ***1.2.4 Aplicaciones metalúrgicas***

En la producción de níquel por el proceso de Sherritt Gordon, el hidrógeno es usado en la etapa de reducción. En esta etapa, el níquel presente en solución como sulfato en presencia de amoníaco se convierte y se precipita como elemento níquel dejando sulfato de amonio. [4]

#### ***1.2.5 Industria electrónica***

El hidrógeno es usado en el crecimiento epitaxial del polisilicio. Esto es hecho por fabricantes de lámina y circuitos. El hidrógeno se utiliza para reducir el tetracloruro de silicio a silicio para el crecimiento epitaxial del silicio. [4]

#### ***1.2.6 Hidrógeno como vector energético***

Inicialmente un vector energético se refiere a las sustancias o dispositivos que almacenan energía de manera que esta puede ser liberada más adelante de forma controlada, esta proviene de productos manufacturados que han utilizado una energía mayor en su elaboración, ejemplo de estas están las baterías, pilas, entre otras. El hidrógeno es un portador de energía como la electricidad, lo que le permite almacenar y transportar energía. [5]

#### ***1.2.7 Hidrógeno como combustible***

Los usos del hidrógeno como combustible en general pueden ser divididos en categorías: estacionaria (desde centrales eléctricas a celdas de combustibles), móvil (transporte terrestre, aéreo, acuático y espacial), respaldo (sistemas portátiles para cualquier práctica) y especialidad (a veces el más interesante), dependiendo de la plataforma seleccionada. Tenga en cuenta que las categorías a menudo cruzarán líneas porque, por ejemplo, una celda de combustible de hidrógeno se puede colocar en una instalación de producción (estacionaria), un automóvil (móvil), un generador de respaldo (respaldo) o una computadora portátil (especialidad). [3]

La distinción debe ser hecha entre el uso directo del hidrógeno y el uso del hidrógeno en celdas de combustibles. Por ejemplo, el hidrógeno puede ser usado directamente en la combustión en automóviles o centrales eléctricas, pero también puede ser usado en segundo lugar, como en celdas de combustibles. [3]

La implementación de este combustible es uno de los más convenientes para mejorar la eficiencia energética y la conservación del medio ambiente. El hidrógeno ayudará a solucionar los obstáculos de almacenamiento y transporte de energía que en el futuro tendrá la utilización masiva de fuentes

renovables, y adicionalmente, durante un periodo de transición proporcionará un uso más eficiente y menos contaminante de los combustibles fósiles. [6]

### **1.3 Producción de hidrógeno**

Aunque el hidrógeno es el elemento más abundante en la Tierra, normalmente no existe en un estado libre y necesita ser extraído de sus compuestos como el agua y el gas natural. El hidrógeno puede ser producido a partir de una variedad de recursos como agua, combustibles fósiles y biomasa a través de diferentes métodos como la electrólisis del agua o la división de agua a alta temperatura. Una de las razones por las que el hidrógeno es un valioso portador de energía son sus diversos métodos de producción. [3] [7]

#### ***1.3.1 Reformado de vapor***

El reformado ocurre cuando un combustible fósil líquido o gaseoso se convierte en hidrógeno, generalmente el metano que actúa como materia prima. Este proceso involucra muchas reacciones complejas. El reformado de vapor es una conversión fuertemente exotérmica de hidrocarburos que reaccionan con vapor de agua. [7]

#### ***1.3.2 Gasificación de carbón y biomasa***

La gasificación es un proceso donde combustibles sólidos como biomasa, residuos sólidos o carbón son convertidos al llamado gas de síntesis. Este proceso incluye varios tipos reacciones que pueden ser homogéneas, heterogéneas, endotérmicas y exotérmicas. Los reactivos comunes son agua y oxígeno, el aire puede ser usado, pero entonces la eficiencia se reduce y ocurren pérdidas debido al calentamiento del nitrógeno. [7]

#### ***1.3.3 Electrólisis del agua***

La electrólisis se considera comúnmente como una opción prometedora para la producción de hidrógeno a partir de recursos de energía renovable. [7]

La electrólisis es un proceso en el cual la energía eléctrica es transformada a energía química. En la electrólisis del agua, reacciones redox del agua ocurren usando una corriente eléctrica directa. La reacción procede con la disociación del agua en iones. [7]

#### ***1.3.4 División termoquímica del agua y termólisis***

La división termoquímica del agua y termólisis son métodos impulsados por la energía térmica para producir hidrógeno a partir del agua. [7]

La termólisis es una reacción de un solo paso que consiste en la disociación del agua y requiere una fuente de energía de alta temperatura, por encima de 2500 K. Esto es necesario para obtener un grado suficiente de disociación y para proporcionar un método eficaz para evitar la obtención de una mezcla explosiva. [7]

Por el otro lado, la división termoquímica incluye una serie de varias reacciones químicas realizadas en bucle y el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno. Las principales ventajas son que normalmente no se requiere de un catalizador, ni se requiere de una membrana para la separación de hidrógeno y oxígeno. La temperatura de operación está en el rango de 600 K a 1200 K. [7]

#### ***1.3.5 División fotoelectroquímica del agua***

La división fotoelectroquímica del agua es una reacción química en la cual las moléculas de agua son descompuestas por fotones. A medida que los fotones interactúan con una molécula de agua objetivo, las reacciones ocurren. [7]

#### ***1.3.6 Fotólisis directa***

La fotólisis directa aprovecha la capacidad de las cianobacteria y algas para descomponer el agua en oxígeno a través de la fotosíntesis. Las algas han desarrollado su capacidad para liberar protones y electrones en el proceso de dividir el agua usando energía solar. El hidrógeno se produce a partir de la absorción directa de la luz y la transferencia de electrones a dos enzimas diferentes, a saber, las hidrogenasas y las nitrogenasas. [8]

#### ***1.3.7 Fotólisis indirecta***

El hidrógeno puede ser producido por algunos microorganismos (algas) que lo producen directamente bajo ciertas circunstancias. Las algas verdes estimulan la vía de la hidrogenasa para generar hidrógeno a través de la fotosíntesis usando energía solar bajo privación de azufre y condiciones anaeróbicas. Las células microbianas consumían grandes cantidades de proteína interna y almidón cuando se privaban de azufre. Aparentemente, tal conversión catabólica mantendría indirectamente la producción de hidrógeno. [8]

La fotólisis indirecta se considera practica si la eficiencia de la conversión de fotones puede mejorarse utilizando reactores de gran tamaño para el cultivo de algas. [8]

### ***1.3.8 Fotofermentación***

En la fotofermentación, por la cual la energía se deriva de la luz solar, los electrones son liberados por las algas verdes para su uso en la fotosíntesis a través del catabolismo del sustrato endógeno. En comparación con la biofotólisis en la que los electrones se derivan del agua, los electrones del metabolismo oxidativo del carbono resultan en la producción fermentativa de hidrógeno. Es decir, los microbios fotosintéticos convierten la energía solar en hidrógeno con alimento orgánico en la fotofermentación. [8]

### ***1.3.9 Fermentación oscura***

Entre los procesos biológicos de biohidrógeno, la fermentación oscura anaerobia (también llamada fermentación heterotrófica) parece ser la más prometedora. Junto con una tasa más alta de rendimiento de hidrógeno, varios sustratos orgánicos, incluidos desechos a base de carbohidratos, pueden utilizarse como sustrato para la producción rentable de hidrógeno. El proceso convencional de fermentación anaeróbica ha sido bien conocido ya que la producción de metano, un portador de energía útil, se asocia con la degradación de contaminantes orgánicos en dos etapas distintas: acidificación y producción de metano. Cada etapa es llevada a cabo por microorganismo específicos a través de interacciones sintróficas. El hidrógeno se genera en el primer paso como producto intermedio, que posteriormente es utilizado como donante de electrones por los metanógenos en el segundo paso del proceso. En la práctica, es posible aprovechar el hidrógeno durante el proceso de acidificación de la fermentación anaerobia, dejando los metabolitos de acidificación para una descomposición metanogénica adicional. Por lo tanto, es factible dejar microbios productores de ácido para generar H<sub>2</sub>, ácidos grasos volátiles y CO<sub>2</sub> mediante la inhibición de las reacciones que consumen hidrógeno en la metanogénesis terminal. Tal propósito puede lograrse manteniendo los cultivos a bajo pH y/o un corto tiempo de retención hidráulica, o inhibiendo los microorganismos hidrogenantes por calor y químicos. [8]

## **1.4 Los inconvenientes del uso de hidrógeno**

Por otro lado, debido a las propiedades mencionadas anteriormente, como su inflamabilidad, los inconvenientes del hidrógeno incluyen su transporte, seguridad y la infraestructura necesaria para

su uso. Principalmente, aunque uno de los métodos propuestos para la distribución de hidrógeno se basa en la idea de tener instalaciones de producción cerca del consumidor final, el desarrollo de una infraestructura tan avanzada para el suministro de hidrógeno es un reto. En consecuencia, cuando se carece de una producción localizada de hidrógeno y de una infraestructura para su distribución, el almacenamiento de hidrógeno es una obligación para su aplicación con éxito, especialmente para las aplicaciones móviles. En la actualidad, la distribución de hidrógeno desde las plantas de producción se realiza principalmente a través de tuberías, remolques con tubos de alta presión y camiones cisterna de hidrógeno licuado, métodos para los cuales existen directrices establecidas para su uso seguro, sin embargo, con las nuevas aplicaciones desarrolladas del hidrógeno, como los contenedores de almacenamiento de alta presión en vehículos de pila de combustibles, estaciones de abastecimiento de alta presión, entre otras, se necesitan directrices y requisitos de seguridad adecuado para el personal no capacitado y el público, y dado que la información de otros combustibles no puede aplicarse directamente al hidrógeno, estas nuevas aplicaciones podrían dañar o ser dañadas por la desinformación. [3]

### **1.5 Producción de hidrógeno por fermentación oscura**

Una gran variedad de microorganismos puede producir hidrógeno a través de sus rutas metabólicas bajo condiciones anaerobias. Hay varios lugares donde las condiciones anaerobias se desarrollan naturalmente y muchos organismos sobreviven en estas condiciones. Bajo condiciones anaerobias, el oxígeno no está presente así que estos tienen que buscar un receptor de electrones para dichos microorganismos. El hidrógeno se produce cuando un electrón se transfiere al protón. [9]

Entre todos los procesos para la producción biológica de hidrógeno, la fermentación oscura es el principal responsable de la mayor parte de biohidrógeno producido. Los productores de hidrógeno asociados con este proceso son conocidos como microorganismos fermentativos oscuros. Estos microorganismos pueden ser clasificados principalmente en función de su sensibilidad hacia la presencia de oxígeno y requisitos de temperatura. Los microorganismos que estrictamente requieren condiciones anaeróbicas son llamados anaerobios estrictos. Por otro lado, los microorganismos que pueden estar en ambientes anaeróbicos y aeróbicos se llaman anaerobios facultativos. Las bacterias anaerobias facultativas son más ventajosas que los anaerobios obligados, ya que son más fáciles de cultivar y mantener en condiciones de laboratorio. [9]

Basado en los requerimientos de temperatura, las bacterias fermentativas oscuras pueden ser clasificadas en tres dominios: mesófilos, termófilos y extremófilos. Los mesófilos requieren temperaturas ambientes para el crecimiento, mientras que los termófilos requieren temperaturas elevadas (45 – 65 °C) y los extremófilos requieren temperaturas muy altas (75 – 110 °C) para su crecimiento y la producción de hidrógeno. Entre estos, se ha informado que los termófilos alcanzan el rendimiento teórico máximo de hidrógeno (4mol/mol glucosa) debido a la barrera termodinámica más pequeña, sin embargo, el requisito de entrada de alta energía para mantener altas temperaturas restringe la aplicabilidad práctica de estos en los estudios a gran escala. [9]

La producción de hidrógeno puede ser llevada a cabo por un solo microorganismo o por un consorcio de varios microorganismos. Para la producción de hidrógeno a gran escala, el uso de un consorcio es ventajoso sobre los cultivos puros, ya que permite que el proceso se lleve a cabo en condiciones no estériles y así minimizar los costos operativos del proceso. En un consorcio, los productores de hidrógeno coexisten con una amplia variedad de bacterias, concretamente, las hidrolizadoras (que eficientemente convierten los carbohidratos complejos en simples), los metanogénicos (que producen metano), los reductores de azufre (que producen sulfuro de hidrógeno), etc. La presencia de estas bacterias no productoras de hidrógeno conduce a un aumento o disminución del rendimiento total de hidrógeno. [9]

Adicionalmente, la aplicación de un consorcio de microorganismos puede ayudar a una mejor utilización de los residuos complejos, ya que hay diferentes tipos de organismos presentes, se dispone de diferentes grupos de enzimas para la degradación y utilización de los residuos. En un consorcio, existe una sinergia entre diferentes tipos de bacterias para el intercambio de metabolitos o señales moleculares, lo que conduce a una división del trabajo para la utilización del sustrato. Además, los cultivos mixtos son más adaptables a las desviaciones de los parámetros ambientales, lo que los hace ideales para aplicaciones industriales. Sin embargo, el principal inconveniente en la selección de estos consorcios es la presencia metanógenos y bacterias consumidoras de hidrógeno dentro de su comunidad. En la mayoría de los casos, se requiere el enriquecimiento del consorcio para la supresión de estas bacterias, aunque la comunidad dominante en el sistema también depende del tipo y composición del sustrato. Por lo tanto, la selección de microorganismos potentes para la producción de hidrógeno es esencial para lograr una alta productividad general del proceso. [9]

## **1.6 Factores que afectan la producción de biohidrógeno por fermentación oscura**

### ***1.6.1 Efecto del pH***

El pH es un parámetro que influye en la producción de hidrógeno ya que afecta el funcionamiento de diferentes enzimas celulares, afectando así la ruta metabólica de los microorganismos. Numerosos microorganismos facultativos generan hidrógeno mediante la oxidación de la glucosa a piruvato mediante la glucólisis. El metabolito final producido por la oxidación del piruvato determina el rendimiento de hidrógeno. Cada enzima tiene su rango óptimo de pH en el que su actividad es máxima. Así, el pH también afecta a la actividad de la hidrogenasa, que es una enzima clave para la producción de hidrógeno. Si la concentración de ácido aumenta en el medio de fermentación, esto conduce a la reducción del pH del medio, esto, a su vez, desencadena un cambio en el metabolismo hacia la conversión de ácidos en alcoholes para reducir la toxicidad que ofrece la acumulación de ácidos. Sin embargo, se sabe que el mismo efecto de inhibición se produce a bajo pH cuando los ácidos no polares no disociados presentes en el medio, penetran en las paredes celulares. En caso de utilizar lodos o cultivos mixtos como inóculo, es esencial suprimir las bacterias consumidoras de hidrógeno. Si el pH es inferior a 5,0, la producción de hidrógeno se reduce debido a la formación de metabolitos ácidos que afectan a la capacidad de las células para mantener el pH interno. La disminución del pH provoca una reducción en el nivel intracelular de ATP e inhibe la captación de glucosa. Nath et al. citado en [9] observaron que el pH óptimo para maximizar la tasa de producción de hidrógeno dependía del tipo de microorganismo y del sustrato. Mientras que, varios estudios han demostrado que el pH del medio, entre 5,0 y 6,0, es adecuado para obtener un mayor rendimiento de hidrógeno. Un pH del medio de cultivo distinto al óptimo conduce a la reducción en la producción total de hidrógeno. Por lo tanto, el control del pH es muy importante para maximizar la producción de hidrógeno. [9]

### ***1.6.2 Efecto de la temperatura***

La producción de hidrógeno a través de la fermentación oscura puede ocurrir a diferentes temperaturas dependiendo del tipo de microorganismos: mesófilos (25 - 40 °C), termófilos (49 – 65 °C) termófilos extremos (65 - 80 °C) o hipertermófilos (>80 °C). En general, la mayoría de los estudios (cerca del 73%) a escala laboratorio se han realizado con mesófilos. Hay un efecto significativo de la temperatura en la producción de hidrógeno, ya que afecta a la tasa de crecimiento del microorganismo y la tasa de utilización del sustrato. Sin embargo, si la temperatura

excede el valor óptimo puede conducir a la inactivación térmica de las enzimas celulares. Se han realizado numerosos estudios por lotes utilizando cultivos mixtos para mostrar la dependencia de la producción de hidrógeno de la temperatura de operación. La producción de hidrógeno a diferentes temperaturas se correlacionó con el cambio de las rutas metabólicas y los cambios en la comunidad microbiana. Por lo tanto, para optimizar el sistema de producción de hidrógeno, es necesario evaluar críticamente la dependencia de la temperatura de los microorganismos. Los termófilos operan a temperaturas más altas y se ha información de que producen más hidrógeno en comparación con los mesófilos. Una temperatura más alta es termodinámicamente favorable para la producción de hidrógeno debido al incremento de la entropía del sistema, lo que hace que el proceso sea más energético. Simultáneamente, el proceso de utilización de hidrógeno y el aumento de la temperatura son inversamente proporcionales. Sin embargo, desde el punto de vista económico, las condiciones termófilas extremas pueden no ser viables debido a los requisitos energéticos intensivos para mantener las altas temperaturas. [9]

### ***1.6.3 Efecto de la presión parcial del hidrógeno***

La ruta metabólica de producción de hidrógeno es muy sensible a la presión parcial de hidrógeno en el biorreactor. La presión parcial de hidrógeno puede aumentar en el reactor por la acumulación de hidrógeno producido. Según el principio de Le Chatlier, debido a la acumulación de hidrógeno, la reacción de avance será inhibida. Por lo tanto, el aumento de la presión parcial de hidrógeno dentro del reactor reducirá la producción de hidrógeno. Al mismo tiempo, puede producirse un cambio en la ruta metabólica también puede tener lugar hacia la producción de metabolitos finales reducidos, como el etanol, el ácido láctico, el butanol, la acetona, etc. Muchos estudios han demostrado que, para la producción continua de hidrógeno, la presión parcial de hidrógeno es un factor crítico. Algunos estudios informaron de una correlación entre la temperatura de operación y la presión parcial de hidrógeno óptima. Por lo tanto, la eliminación del hidrógeno producido en el sistema es necesaria para mantener una mayor producción de hidrógeno. Se han desarrollado varias estrategias para la separación o eliminación del hidrógeno del sistema para superar los efectos negativos de la acumulación de hidrógeno tanto en la fase líquida como en la fase gaseosa. [9]

#### ***1.6.4 Efecto de los productos metabólicos solubles***

En la producción fermentativa de hidrógeno, se sabe que los productos finales del metabolismo afectan el rendimiento de hidrógeno. Principalmente, se producen ácido acético, etanol, ácido butírico y ácido propiónico como los metabolitos finales solubles dominantes. Sin embargo, hacia la fase estacionarios, la fuerza iónica aumenta debido a la concentración de metabolitos finales que conducen a la lisis celular. También se ha informado de que el protón puede permeabilizar la membrana celular de las bacterias productoras de hidrógeno y perturbar la fisiología de la célula a una mayor concentración de ácido. En estas condiciones se requiere energía de mantenimiento para restaurar el equilibrio fisiológico de la célula. Sin embargo, la redirección de la energía de mantenimiento compromete significativamente el crecimiento bacteriano y la producción de hidrógeno. [9]

#### ***1.6.5 Rol de los nutrientes***

La composición del medio juega un papel crucial en la producción de hidrógeno, ya que es un producto asociado al crecimiento. La suplementación de fosfato, nitrógeno y otros minerales traza son vitales para obtener el máximo rendimiento del hidrógeno, utilizando carbohidratos como sustrato para la producción de hidrógeno. El nitrógeno es un componente importante de los aminoácidos y es necesario para el crecimiento óptimo de los microorganismos. Los estudios han demostrado que, con respecto a la producción de hidrógeno, el nitrógeno orgánico parece más adecuado que el inorgánico. Sin embargo, aunque la suplementación de la fuente de nitrógeno aumenta el rendimiento global de hidrógeno, también aumenta el costo de producción. Por lo tanto, es necesario encontrar alternativas más baratas que puedan sustituir a la fuente de nitrógeno en el medio de producción de hidrógeno. La relación C/N también juega un papel importante en la estabilización del proceso de fermentación oscura y afecta a la productividad de hidrógeno y la tasa de producción específica de hidrógeno. Las concentraciones óptimas de fosfato también son deseables para mejorar el rendimiento general del proceso. El fosfato actúa como un nutriente inorgánico importante para la producción óptima de hidrógeno. Un exceso de fosfato puede conducir a la producción de más ácidos grasos volátiles (AGV). Sin embargo, una mayor producción de AGV no es deseable ya que desvía los reductores celulares de la producción de hidrógeno. [9]

### ***1.6.6 Rol de los iones metálicos***

En el proceso de fermentación oscura, es vital la suplementación de iones metálicos adecuados en el medio. Estos iones metálicos actúan como cofactores de las enzimas y también participan en los procesos de transporte celular. La hidrogenasa, la enzima clave en la producción de hidrógeno contiene un centro bimetálico Fe-Fe. También está rodeado por grupos de proteínas FeS. Por lo tanto, varios investigadores han estudiado el efecto de la suplementación de hierro en la producción de biohidrógeno. Lee et al. citado en [9] estudiaron el efecto de la concentración de hierro en la fermentación del hidrógeno y descubrieron que a una mayor concentración de iones Fe influía positivamente en el sistema. En otro estudio, Lin y Lay informaron del impacto de numerosos oligoelementos, como Mg, Na, Zn, Fe, K, I, Co, Mn, Ni, Cu, Mo y Ca, para la producción de hidrógeno utilizando *C. pasteurianum*. El estudio demostró que las concentraciones adecuadas de Mg, Na, Zn y Fe eran necesarias para obtener un mayor rendimiento de hidrógeno. Basándose en estos resultados propusieron una formulación nutritiva óptima que contenía: 120 mg/L  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 1000 mg/L NaCl, 0.5 mg/L  $\text{ZnCl}_2$  y 3 mg/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . [9]

### ***1.6.7 Efecto del tiempo retención hidráulica***

En el caso de la producción continua de hidrógeno, el tiempo de retención hidráulica (TRH) es un factor crucial para la producción de hidrógeno. El TRH es el tiempo que el medio líquido permanece en el interior del biorreactor y es un factor clave para la selección de microorganismos en función de su tasa de crecimiento. La tasa de crecimiento específica de las bacterias productoras de metano es muy baja (alrededor de  $0.0167 - 0.02 \text{ h}^{-1}$ ), en comparación con las bacterias productoras de hidrógeno ( $0.172 \text{ h}^{-1}$ ). Por lo tanto, en los estudios en los que se utiliza un consorcio mixto de microorganismos, como lodos residuales, un TRH corto es capaz de impedir el crecimiento de los metanógenos de crecimiento lento del reactor. Eventualmente, esto puede conducir a una población mixta rica en bacterias productoras de hidrógeno. [9]

## **2. DETERMINACIÓN DEL RESIDUO AGROINDUSTRIAL A APROVECHARSE COMO SUSTRATO**

Con el fin de determinar el residuo agroindustrial que va a ser aprovechado como sustrato para la producción de hidrógeno, en este capítulo se presenta la información resultante de la revisión bibliográfica realizada en cuanto a los residuos agroindustriales de la industria colombiana. Además, se mostrarán algunas de las propiedades fisicoquímicas propias de estos residuos. Cabe aclarar, que los residuos agroindustriales son aquellos generados en la implementación de operaciones unitarias para el procesamiento, beneficio o transformación de materias primas, es decir, residuos de la actividad económica que combina procesos agrícolas con industriales para producir alimentos o materias primas semielaboradas para su comercialización, a diferencia de los residuos agropecuarios que provienen de las actividades agrarias, ganaderas o silvícolas, que no se tendrán en cuenta para este trabajo. [10] [11]

### **2.1 Industria arrocera**

La industria molinera de arroz en Colombia tiene como razón de ser la transformación industrial del arroz paddy verde en arroz blanco y otros subproductos que se derivan del proceso industrial. Entre los subproductos se encuentran: el arroz integral, el arroz partido (cristal) y la harina de arroz. Entre los subproductos de desecho se encuentran el afrecho (cascarilla) de arroz y la granza (triturado) de arroz. [12]

Según estadísticas del Convenio DANE Fedearroz, el área destinada a la siembra de arroz en Colombia es de aproximadamente 400.000 hectáreas en las cuales se producen alrededor de 2.000.000 toneladas de arroz paddy seco y 400.000 toneladas de cascarilla por año. A futuro se espera que el consumo per cápita de arroz aumente hasta el doble del valor actual, lo cual se traduce en el incremento en la producción de arroz y por ende en la generación de cascarilla de arroz. [13]

El poco valor que tiene la cascarilla, se debe principalmente a las pocas tecnologías implementadas en el país para su procesamiento y posterior valorización, ya que su uso se limita a la quema como combustible sólido (con la consecuente emisión de gases al medio ambiente), sin embargo, esta combustión directa tiene sus limitaciones debido su estructura cerrada y, por el alto contenido de sílice, es de baja biodegradabilidad en condiciones ambientales. Otros usos que se le da a este

residuo son como material para abonos, cama para animales e insumo para materiales de construcción. [13] [14]

A continuación, en la Tabla 1, se muestra la composición de la cascarilla de arroz, donde extraíbles hace referencia a compuestos de composición química variada, como grasas, gomas, resinas, aceites esenciales, azúcares, alcaloides, almidones y taninos. Adicionalmente, la cascarilla de arroz posee una relación carbono-nitrógeno (C/N) de alrededor de 85:1. [15] [16]

**Tabla 1.**

*Composición química de la cascarilla de arroz colombiana*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (% p/p)</b>
Hemicelulosa	15,94
Celulosa	33,81
Lignina	20,78
Sílice	16,81
Extraíbles	12,66

*Nota.* Esta tabla muestra la composición de la cascarilla de arroz colombiana. Tomado de: “Aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz.” 2017.

## **2.2 Industria de chocolates y derivados**

El sector del cacao y sus derivados está conformado por dos eslabones: la producción de cacao en grano y la fabricación de productos derivados del cacao, licor de cacao, manteca de cacao, polvo de cacao, chocolates y confites. El proceso productivo del cacao está relacionado con el aprovechamiento del 30% de su fruto, el porcentaje restante es la cantidad de subproductos que se generan en distintas etapas del proceso, tales como: la cáscara del fruto, el mucílago y la cascarilla del grano. [17] [18]

Según la FAO entre los años 2013 y 2016, Colombia sembró entre 155.551 y 165.844 ha, con un rendimiento promedio de 317 kg de cacao por hectárea y una producción que osciló entre 46.739 y 56.163 toneladas de granos de cacao; y Adicionalmente, en el procesamiento de 200 toneladas

de cacao seco en un año se generan aproximadamente 150.000 litros de lixiviado, que es rico en azúcares fermentables y de carácter ácido. [19] [20]

Considerando las primeras etapas del proceso productivo del cacao, tales como la cosecha, selección y quiebra del fruto, se producen aproximadamente 10 toneladas de cascara de la mazorca de cacao por cada tonelada de grano seco obtenida, que, según lo mencionado anteriormente, corresponde prácticamente a la totalidad de la cantidad desechada de residuos por esta industria. En la Tabla 2 se muestra la composición de este desecho de proceso de la industria de procesamiento del cacao, donde los carbohidratos hace referencia a los polisacáridos de carácter pectinolítico, las celulosas y hemicelulosas. [21] [22]

**Tabla 2.**

*Composición química de la cáscara de la mazorca de cacao*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (% p/p)</b>
Humedad	85
Proteína	1,07
Minerales	1,41
Grasa	0,02
Fibra	5,45
Carbohidratos	7,05
Nitrógeno	0,171
Fósforo	0,026
Potasio	0,545
Pectinas	0,89

*Nota.* En esta tabla se muestra la composición química de la cascara de la mazorca de cacao (cascara del fruto de cacao). Tomado de: C. Ardila Suárez and S. C. Carreño Jerez, “APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE LA MAZORCA DE CACAO COMO ADSORBENTE,” 2011.

En la siguiente etapa del proceso (la fermentación), se obtiene el mucilago, que rodea la semilla de cacao y se pierden en un gran porcentaje, ya que solo una pequeña parte (5 – 7 %) del total que

rodea la semilla es utilizada específicamente en la fermentación. A continuación, en la Tabla 3, se presenta la composición química del mucilago de cacao. [23]

**Tabla 3.**

*Composición química del mucilago de cacao*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (% p/p base húmeda)</b>
Humedad	79,2 – 84,2
Proteína	0,09 – 0,11
Azúcares	12,50 – 1,59
Glucosa	11,6 – 15,32
Pectinas	0,9 – 1,19
Ácido cítrico	0,77 – 1,52
Cenizas	0,40 – 0,50

*Nota.* En esta tabla se muestra la composición química del mucilago de cacao. Tomado de: K. L. Ortiz-Valbuena and R. Álvarez-León, “Efecto del vertimiento de subproductos del beneficio de cacao (*Theobroma cacao* L.) sobre algunas propiedades químicas y biológicas en los suelos de una finca cacaotera, municipio de Yaguará (Huila, Colombia),” *Bol. Cient. del Cent. Museos*, vol. 19, no. 1, pp. 65–84, 2015, doi: 10.17151/bccm.2015.19.1.5.

Ya más relacionado con la industria de las semillas de cacao, estas pasaran a la siguiente etapa del proceso: el secado, en la cual se retira la humedad del producto, lo que facilita la remoción de la cascarilla en el proceso de descascarillado, en donde se extrae el último subproducto del cacao, la cascarilla, que corresponde al 12 – 20% de las semillas fermentadas, la cual es desechada principalmente y tan solo en algunos casos se ha usado para la alimentación del ganado. En la Tabla 4 se puede observar la composición de este último subproducto cacao.

En la Tabla 5 se muestra la cantidad producida de cada residuo de la industria del cacao y sus derivados para el año 2018 en Colombia. Adicionalmente, para los residuos derivados del proceso productivo de transformación del cacao se muestra que estos presentan relaciones C/N de 27,8. [25]

**Tabla 4.***Composición química de la cascarilla de cacao*

<b>Parámetro</b>	<b>Porcentaje (% residuo seco)</b>
Carbohidratos	17,8 – 23,17
Celulosa	15,1
Lignina	32,41
Proteínas totales	15,79 – 18,1
Lípidos	2,02 – 6,87
Pectina	4,7 – 6,0
Cenizas	5,96 – 11,42
Fibra dietética total	18,6 – 60,6
Teobromina	1,3
Cafeína	0,1
Fenoles totales	1,32 – 5,78
Antocianinas	0,4
Taninos	3,3 – 4,46
Flavonoles	1,5

*Nota.* Esta tabla muestra la composición por compuestos de la cascarilla de cacao. Tomado de: T. M. Bernal Cedillo, “Revalorización de residuos de la Industria de Chocolate para la obtención de biomoléculas de interés industrial a partir de la cascarilla de cacao,” 2021.

**Tabla 5.**

*Producción aproximada de los residuos de la industria del cacao en el año 2018*

<b>Residuo</b>	<b>Cantidad producida (ton/año)</b>
Cascara de la mazorca	37.711
Mucilago	3.165
Cascarilla	1.582

*Nota.* En esta tabla se muestra una aproximación de la cantidad producida de cada uno de los residuos de la industria del cacao. Tomado de: M. Lozano, “Utilización de los subproductos del beneficio del cacao: una revisión,” pp. 6–17, 2020.

### **2.3 Industria del azúcar**

La industria azucarera es una de las más representativas en Colombia, en donde la caña de azúcar es utilizada generalmente en la producción de azúcar y alcohol carburante, para la producción de estos se tienen destinadas aproximadamente 232.070 hectáreas de caña de azúcar teniendo una producción de 169,37 ton/ha de caña dejando una cantidad promedio de residuos lignocelulósicos de 5 millones de toneladas anuales, los cuales están constituidos principalmente por el cogollo y el bagazo de caña. En cuanto a la cantidad de residuos que se producen, del bagazo de caña se tiene un 15% es decir 750.000 ton/año y del cogollo un 7,5% es decir 375.000 ton/año aproximadamente. [28] [29]

Durante la cosecha también se generan residuos de hojas verdes o secas, los cuales en su mayoría son olvidados o quemados sin aprovechar su potencial tanto energético como económico. Estos residuos lignocelulósicos se han tomado en cuenta en la producción de biocombustibles como lo es el bioetanol, el cual busca disminuir la dependencia del petróleo y la contaminación por emisiones. En las Tablas 6 y 7 se pueden observar las composiciones químicas de la caña de azúcar y sus residuos respectivamente. [28]

**Tabla 6.**

*Composición química de la caña de azúcar*

<b>Parámetro</b>	<b>Porcentaje (% residuo seco)</b>
Materia Seca	26,2
Proteína	2,0 – 5,4
Fibra	27,9
Calcio	0,2 – 0,5
Fósforo	0,09 – 0,14

*Nota.* Esta tabla muestra la composición por compuestos de la caña de azúcar. Tomado de: E. Lagos and E. Castro, “Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes,” *Agron. Mesoam.*, vol. 30, no. 3, pp. 917–933, 2019.

**Tabla 7.**

*Composición química y mineral de los subproductos de la caña de azúcar*

<b>Parámetro (%)</b>	<b>Cogollo</b>	<b>Bagazo</b>
Materia Seca	25,0	44,6
Humedad	75,0	55,4
Materia orgánica	93,6	97,7
Ceniza	6,4	2,3
Celulosa	40,3	34,1
Hemicelulosa	23,7	31,1
Lignina	4,2	6,6
Fibra Cruda	28,3	33,3
Nitrógeno	0,7	0,5
Fósforo	0,2	0,1
Potasio	2,1	1,9
Calcio	0,3	0,1
Magnesio	0,2	0,1
Azufre	0,2	0,1
Relación C/N	49/1	103/1

*Nota.* Esta tabla muestra la composición química de los subproductos agroindustriales de la caña de azúcar. Tomado de: E. Lagos and E. Castro, “Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes,” *Agron. Mesoam.*, vol. 30, no. 3, pp. 917–933, 2019. | T. Ray, “Relación-carbono-nitrógeno-en-compostas.” 2018.

## **2.4 Industria de procesados de papa, plátano y yuca**

### ***2.4.1 Procesados de papa***

En Colombia la papa es uno de los cuatro alimentos básicos de la ingesta diaria (papa, arroz, panela y carne bovina) con un consumo aproximado de 60 kg por persona al año, lo que representa una participación del 19% del total de la producción agrícola en el año según lo reporta el DANE-ENA (2017). Para el año 2020 se proyectó un área de siembra de 125.000 hectáreas y una producción de 2.696.660 toneladas al año, en cuanto a los residuos, estos se presentan en un 15% de la producción total, dando un aproximado de 404.499 ton/año. [32]

Con respecto a la cantidad de residuos que se generan en la industria, tanto sólidos como líquidos, los más significativos son la cáscara de la papa, las papas verdes o las papas que no cumplen con los parámetros de calidad exigidos, los cuales generan pérdidas de materia prima, utilidades económicas y posibles daños sanitarios al ser arrojados a rellenos sanitarios, provocando problemas por su descomposición, razón por la cual se busca el aprovechamiento de estos residuos por medio un tratamiento o transformación aprovechando sus diversos beneficios y propiedades. [33]

En la Tabla 8, se muestra la composición nutricional de la papa para su consumo, sin embargo, cabe aclarar que la papa posee los siguientes componentes nutritivos: un alto nivel de energía, ya que el 60% de su componente seco está compuesto por almidón, carbohidratos, proteína, grasa y vitaminas como el ácido ascórbico, B1, B6 y niacina, los cuales se encuentran en la piel o cáscara. En cuanto a los componentes no nutritivos posee agua, celulosa, hemicelulosa, pectina en forma de pectatos, ácidos orgánicos y enzimas. En la Tabla 8 se muestra el aporte nutricional de la papa fresca. [34]

Al finalizar la cosecha, la papa presenta en promedio un 80% de agua y un 20% de materia seca (el 60% la materia seca equivale a almidón). [36]

**Tabla 8.***Composición química de la papa*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Agua	77
Carbohidratos	17
Proteínas	1,9 – 2,8
Lípidos	0,1
Vitamina C	19,7
Hierro	0,8
Calcio	12
Niacina	1,44
Fibra	1,8
Relación C/N	35

*Nota.* En esta tabla se muestran los diferentes valores nutricionales de la papa para el consumo humano. Tomado de: J. Jaramillo and I. Ramírez, “Descripción de los procesos para el manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos de la papa generados en la producción de papa francesa en la empresa McCain Food.” 2016, [Online] Disponible: [https://issuu.com/maosabo/docs/descripci\\_n\\_de\\_los\\_procesos\\_para\\_e](https://issuu.com/maosabo/docs/descripci_n_de_los_procesos_para_e). | S. K. Khanal, T. G. T. Nindhia, and S. Nitayavardhana, Biogas from wastes: Processes and applications. Elsevier B.V., 2019.

En cuanto a la cáscara esta posee un alto contenido de humedad y de potasio, presenta el 1-2% de fibra alimentaria del total de la papa, además, posee carbohidratos y proteínas, por lo que es una buena fuente de energía, que representa cerca del 2,1% del total del producto fresco. Por otro lado, la cáscara proporciona una fuente para recuperar compuestos fenólicos, puesto que el 50% de estos se encuentran en la cáscara. La Tabla 9 muestra la composición de la cáscara de papa. [37]

**Tabla 9.**

*Composición química de la cáscara de papa*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Humedad	85,06
Carbohidratos totales	68,7
Azúcares solubles totales	1
Azúcares reductores	0,61
Almidón	1,3
Proteínas	8
Ceniza	6,34
Grasa	0,1
Relación C/N	25/1

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química de la cáscara de la papa. Tomado de: J. QUISPE, “Obtención y caracterización de la fibra dietética a partir de los residuos de papa (*Solanum tuberosum*),” LLANCO SEDANO, James Humberto., no. 25265, p. 79, 2014, [Online] Disponible: [repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/733%0A](http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/733%0A). | Bach ISIQUE VALVERDE, M. Y. JAVIER Bach SING LEZAMA, and J. Luis, “Influencia de la hidrólisis química en las características fisicoquímicas y funcionales de los residuos industriales de papa, camote y yuca,” 2017.

Entre los carbohidratos presentes en la papa están la celulosa, sacarosa, glucosa, almidón y la pectina, pero los almidones que más se presentan son la amilosa y la amilopectina en la proporción de 1:3, además se debe tener en cuenta que el contenido de almidón varía según el tipo de papa, pero este se encuentra en un rango aproximado del 18% al 28%. [38]

#### **2.4.2 Procesados de plátano**

El plátano es un alimento saludable para ser consumido por su alto contenido de hidratos de carbono, potasio y magnesio, además es importante debido a que hace parte de la canasta básica familiar. La producción de plátano prevalece en la Región Andina pero también se da en la región

de la Orinoquía. Los departamentos que más se destacan son: Quindío, Meta, Antioquia, Tolima, Córdoba, Arauca y Valle. [39]

El plátano posee alto nivel nutritivo porque contiene proteínas (1,2%) y lípidos (0,3%), además posee un 20% de hidratos de carbono. Cuando se tiene el plátano inmaduro el carbohidrato que se presenta en mayor cantidad es el almidón, pero cuando el plátano comienza su proceso de maduración, estos carbohidratos se convierten en azúcares sencillos como sacarosa (66%), glucosa (20%) y fructosa (14%) siendo más sencillo su digestión. [40]

Para el cultivo de plátano en Colombia hay destinado más de 400.000 hectáreas, en donde 280.600 hectáreas se presentan en la zona central cafetera con una producción de 1,7 millones de toneladas al año y su rendimiento promedio es de 6,1 tonelada por hectárea. [41]

Los plátanos poseen la misma característica de las frutas, puesto que poseen un alto valor nutritivo y este se debe al contenido de carbohidratos y azúcares presentes en la pulpa ya que son fácilmente asimilables. En la Tabla 10 se presenta la composición química del plátano, además se tiene en cuenta los principales carbohidratos presentes son sacarosa (66%), glucosa (20%) y fructuosa (14%). [42]

La producción de plátano en Colombia en 2016 alcanzó 4,8 millones de toneladas, de las cuales el 3,6% es exportado, el 1% se destina al consumo de la agroindustria y el resto se consume en los hogares. [43]

Alrededor del 95% de los residuos que deja la industria no se aprovecha con eficiencia, ya que su producción se enfoca primordialmente en la canasta familiar y las cáscaras son desechadas o usadas como abono, pero esta última utilidad no es tan viable por la posible formación de microorganismos, que pueden afectar los cultivos. [39]

**Tabla 10.***Composición química del plátano*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Carbohidratos	20 – 32,3
Lípidos	0,3
Proteína	1,1 – 1,7
Agua	65,6 – 75,1
Fibra	2,5 – 3,4
Cenizas	0,8
Relación C/N	26/1

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química del plátano. Tomado de: M. Carvajal and F. Murgueitio, “Caracterización de las proteínas de la cáscara de plátano tipo williams,” *Occup. Med. (Chic. Ill).*, vol. 53, no. 4, p. 130, 2017. | EFSA, “Banano, banana,” *Nutrición*, pp. 295–296, 2019, [Online] Disponible: <http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/platano.pdf>. | G. K. Latinwo and S. E. Agarry, “Modelling the kinetics of biogas production from mesophilic anaerobic co-digestion of cow dung with plantain peels,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 4, no. 1, pp. 55–63, 2015, doi: 10.14710/ijred.4.1.55-63.

En cuanto a la cáscara del plátano, este representa un 30% del peso total de plátano, es rico en proteínas, fibra, ácidos grasos, y posee antioxidantes. Respecto a los carbohidratos, está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina; su composición varía dependiendo del tipo de plátano. A continuación, en la Tabla 11 se observa la composición física de la cáscara de plátano. [42]

**Tabla 11.**

*Composición química de la cáscara de plátano*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Humedad	91,62
Proteína	5,19
Fibra	11,58
Ceniza	16,30
Calcio	0,37
Fósforo	0,28
Relación C/N	21,92/1

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química de la cáscara de plátano. Tomado de: M. Carvajal and F. Murgueitio, “Caracterización de las proteínas de la cáscara de plátano tipo williams,” *Occup. Med. (Chic. Ill.)*, vol. 53, no. 4, p. 130, 2017. | G. K. Latinwo and S. E. Agarry, “Modelling the kinetics of biogas production from mesophilic anaerobic co-digestion of cow dung with plantain peels,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 4, no. 1, pp. 55–63, 2015, doi: 10.14710/ijred.4.1.55-63.

### **2.4.3 Procesados de yuca**

El cultivo de yuca es importante para la bioeconomía por su alto contenido de almidón, el cual puede ser usado para la producción de bioetanol, bioquímicos y bioplásticos, y de aplicación en diversas industrias. La yuca es el quinto bien agrícola que más se produce en volumen después de la caña de azúcar, plátano, papa y el arroz. Colombia se ubica como el tercer productor de yuca de Latinoamérica, produciendo en 2019 2,8 millones de toneladas en un terreno destinado para su cosecha de 259.931 hectáreas de tierra, dejando en su producción un 15% de desechos, aproximadamente 420.000 ton/año. La yuca se cultiva en los 32 departamentos del país, pero los principales departamentos que producen yuca son: Bolívar, Sucre, Orinoquía y Cauca. [46]

A nivel nacional se estima que el 94.4% del total de la producción de yuca es destinado para el consumo humano y solo el 5,6% para la industrialización es decir para la producción de subproductos como: harina, almidón, trozos secos entre otros. [37] [46]

En cuanto a su valor nutricional se tiene un buen aporte de hidratos de carbono por parte de la raíz en un 38%, posee un alto contenido de agua y bajos niveles de proteínas y grasas. Su composición porcentual se basa en 11,8 % de lignina, 38,8% de celulosa y 7,2% de hemicelulosa. A continuación, en la Tabla 12, se presenta la composición química de la yuca y en la Tabla 13, se presenta la composición de la cáscara de la yuca. [37]

**Tabla 12.**

*Composición química de la yuca*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Carbohidratos	90-95
Cenizas	1,5 – 2,25
Proteína	0,8 – 1
Grasa	0,5 – 0,1
Fibra	1 – 2
Relación C/N	29,1

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química de la yuca. Tomado de: Bach ISIQUE VALVERDE, M. Y. JAVIER Bach SING LEZAMA, and J. Luis, “Influencia de la hidrólisis química en las características fisicoquímicas y funcionales de los residuos industriales de papa, camote y yuca,” 2017. | R. Lin, J. Cheng, and J. D. Murphy, “Unexpectedly low biohydrogen yields in co-fermentation of acid pretreated cassava residue and swine manure,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 151, no. July, pp. 553–561, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.006.

La cáscara de yuca es un subproducto que se obtiene de la utilización de la raíz de yuca, tanto en alimentación humana directa como en la industrialización, como se mencionó anteriormente. Representa un 15% - 20% del peso total de la raíz y contiene una mayor proporción de proteína, grasa. Fibra y minerales que la pulpa, además, en la corteza se presenta un buen contenido de

almidón y fibra. Se ha identificado que la cáscara seca tiene la capacidad de rehidratarse hasta en un 160 por ciento de su peso. [37]

**Tabla 13.**

*Composición química de la cáscara de yuca*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Humedad	6,72
Cenizas	3,2 – 5,55
Proteína cruda	1,36 – 5,62
Grasa	0,28 – 0,48
Almidón	35,08
Amilosa	21,61
Azúcares totales	29,53
Azúcares reductores	1,98
Carbohidratos	26,9 – 38
Fibra	1,8
Relación C/N	44,82/1

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química de la cáscara de la yuca. Tomado de: Y. Román, N. Techeira, J. Yamarte, Y. Ibarra, and M. Fasendo, “Caracterización físico-química y funcional de los subproductos obtenidos durante la extracción del almidón de musáceas, raíces y tubérculos,” *Interciencia*, vol. 40, no. 5, pp. 350–356, 2015. | N. K. Kortei, V. P. Dzogbefia, and M. Obodai, “Assessing the Effect of Composting Cassava Peel Based Substrates on the Yield, Nutritional Quality, and Physical Characteristics of *Pleurotus ostreatus* (Jacq. ex Fr.) Kummer,” *Biotechnol. Res. Int.*, vol. 2014, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1155/2014/571520.

## 2.5 Industria de lácteos

En Colombia la industria láctea es importante para la economía nacional ya que representa el 2,3% del PIB nacional y el 24,3% del PIB agropecuario, su producción radica en 22 departamentos, siendo Cundinamarca, Antioquía, Boyacá los más destacados. En cuanto al territorio designado

para la producción se estiman más de 400.000 fincas con más de 395.215 unidades productoras de leche. [50]

La proteína presente en la leche varía entre el 2,9% y 4%, entre los minerales presentes está: el Sodio, Potasio, Magnesio, Calcio, Hierro, Fósforo, Zinc, Yodo y en cuanto a las vitaminas presentes se tiene la A, D, E, K, B1, B2, B6, B12, C, Niacina. [51]

Con respecto a los residuos de esta industria se tienen desechos orgánicos como el suero de la leche o lactosuero, se obtiene después de realizar el proceso de coagulación de la leche cuando se está elaborando el queso, una vez que se separa la cuajada (caseína y grasa) del queso. Este residuo se puede aprovechar para producción de biogás, generación de energía eléctrica y calor, este se puede utilizar en biodigestores a lo largo de la cadena productiva, generando una producción aproximada de 2.000m<sup>3</sup> de biogás, siendo capaz de generar 150 kW. En la producción de queso por cada kilogramo de este se obtiene 9 litros de suero, para el 2019 se produjeron 1.460.448 kg de queso, por lo tanto, se obtuvieron 13.144.032 litros de suero (12933,7 ton/año); se debe tener en cuenta que este suero es rico en lactosa y proteína, pero pobre en grasas y dependiendo del tipo de suero del cual proviene este puede tener una carga orgánica DQO entre 25.000 – 80.000 mg/l, y tener 50% de los nutrientes iniciales de la misma. [52]

El lactosuero representa alrededor del 90% del volumen de la leche y contiene más de la mitad de sus nutrientes, por lo que se debe tener en cuenta que la leche es uno de los alimentos más completos que existe debido a su alto valor nutritivo, está compuesta principalmente por grasa, proteínas, hidratos de carbono (lactosa), calcio, minerales y sal, además, contiene un 87% de agua, lo que permite que los minerales y carbohidratos estén disueltos. Las proteínas están en forma de suspensión y las grasas se encuentran en forma de pequeñas partículas insolubles en agua y, por último, presenta una relación C/N de 0,85. [53]

El lactosuero contiene la mayor parte de sus compuestos hidrosolubles, aunque su composición varía dependiendo del origen de la leche y del tipo de queso a elaborar. Su composición química general se puede observar en la Tabla 14. [54]

**Tabla 14.**

*Composición química del lactosuero*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Lactosa	95
Proteínas	25
Materia grasa	8
Agua	93,1
Proteína cruda	0,9
Minerales	0,6
Grasa	0,3

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química del lactosuero. Tomado de: Prolactea Entrepinares Group, “SUERO DE LECHE – Prolactea.”.

## **2.6 Industria cervecera**

Colombia es un país cervecero que tiene a Bavaria como su mayor representante comercial en la industria cervecera, siendo reconocido a nivel nacional e internacional, igualmente el crecimiento de esta industria también se atribuye a las 255 cervecerías artesanales que controlan el 1,2% del mercado, sin embargo, debido al tamaño de esta industria, esta es una de las que más genera residuos aprovechables, se estima que entre 3,5 y 8,0 litros de residuos son producidos por cada litro de cerveza final, es decir, que con una producción anual de 22 millones de hectolitros se tienen aproximadamente 6,49 millones de toneladas de residuos al año; por lo tanto, se debe tener en cuenta el adecuado tratamiento para evitar que terminen en las fuentes hídricas con riesgo de contaminación. [55]

Para realizar la producción de cerveza se debe inicialmente procesar la cebada y para obtener el producto final se debe pasar por los procesos de maceración, cocción, fermentación y, por último, maduración. Los principales subproductos generados en la industria cervecera son las raicillas de malta, el mosto, el bagazo y la levadura cervecera, a continuación, se explicará a detalle su proceso de obtención y composición química. [56]

Posterior al proceso de maceración, por medio de una filtración se puede obtener el primer residuo que corresponde a la cascarilla, esta son los brotes separados de la cebada germinada en condiciones controladas de temperatura y humedad en el proceso de malteado y se obtiene por cribado, es decir una clasificación y separación del grano germinado, en términos generales se obtienen 5 kilogramos de raicillas por cada 100 kilogramo de cebada. Este subproducto es básicamente un material lignocelulósico y está conformado por cáscara de grano, pericarpio y fragmentos de endospermo. Su composición química en peso seco se presenta en la Tabla 15. [57]

Las hemicelulosas presentes en mayor proporción en la raicilla son los arabinosilanos y se encuentran unidas a las fibrillas de celulosa, también presenta ácidos fenólicos como por el ejemplo el ácido ferúlico que tiene como función ser un agente de entrecruzamiento entre la lignina y las hemicelulosas, estos compuestos fenólicos poseen un elevado interés dado que tienen un potencial antioxidante. [57]

**Tabla 15.**

*Composición química de la raicilla de malta*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Carbohidratos	
- Celulosa y hemicelulosa	17 -25
- No celulósicos	25 – 35
Proteína	10 – 30
Lignina	8 – 28
Lípidos	<11
Minerales	5
Relación C/N	16

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química de la raicilla de malta. Tomado de: S. Torrente, “Aprovechamiento de los subproductos generados en la industria cervecera,” Fac. Farm. Univ. Comput., pp. 1–20, 2019, [Online] Disponible: [http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/SANDRA ESTEBAN TORRENTE.pdf](http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/SANDRA_ESTEBAN_TORRENTE.pdf).

Por otro lado, el mosto es el líquido que se obtiene previo a la fermentación de una cerveza y en su composición estándar hay aproximadamente un 90% de carbohidratos que incluye azúcares derivados de las industrias de malta, el lúpulo y otros añadidos durante la cocción como glucosa, fructosa, sacarosa, maltosa, maltotriosa y dextrinas, cuyo perfil y concentración tiene una influencia directa en la eficiencia de fermentación y en el metabolismo de la levadura, cuando se eleva los niveles de sacarosa en el mosto se eleva la producción de alcoholes superiores, mientras que el metabolismo de la maltosa disminuye la concentración de estos compuestos en comparación con fuentes de carbono más fácilmente asimilables, como glucosa y fructosa. [58]

Además, se tiene el bagazo de cerveza, que representa el 85% de los subproductos generados por esta industria y es el producto resultante del proceso de prensado y filtración del mosto, obtenido tras la sacarificación del grano de cebada malteado, es rico en proteína y fibra, y presenta la composición que se puede observar en la Tabla 16. Adicionalmente posee vitaminas, aminoácidos y compuestos fenólicos, y entre los componentes minerales se encuentran el calcio, fósforo, selenio y también presenta biotina, colina, ácido fólico, niacina, ácido pantoténico, riboflavina, tiamina y vitamina B6. Entre los aminoácidos están presentes la leucina, valina, alanina, serina, glicina, tirosina, lisina, prolina, treonina, arginina, cistina, histidina, isoleucina, metionina, fenilalanina, triptófano, glutámico y ácido aspártico. [56] [59]

**Tabla 16.***Composición química del bagazo de cerveza*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Celulosa	15,5 – 25
Hemicelulosa	28 – 25
Proteína	15 – 26
Fibra	70
Lignina	28
Lípidos	3,9 – 18
-Triglicéridos	67
Cenizas	2,5 – 4,5

*Nota.* En esta tabla se muestran la composición química del bagazo de cerveza. Tomado de: T. Fedna and S. H. S. Calsamiglia, “Bagazo de cerveza: un subproducto con múltiples aplicaciones,” Bach, pp. 17–19, 2018.

Por último, se encuentra la levadura cervecera esta forma una biomasa de células de *Saccharomyces cerevisiae*, esta biomasa se obtiene cuando se realiza la filtración del mosto y al terminar la etapa de fermentado. Las levaduras deben pasar por un proceso de centrifugación para ser separadas y seguido a esto lavadas, se pueden pasar por unos filtros de tal manera que se pueda reducir el contenido de agua, y así, obtener un producto de 68 o 70 % de humedad, el cual se conoce como levadura prensada, por último, esta es envasada en bloques o en forma granulada. [57]

La levadura presenta una composición química de 40% de proteínas, 25% de polisacáridos, 5% de lípidos, 15% de ácidos nucleicos, y un 5% de compuestos hidrosolubles entre los cuales están los aminoácidos, azúcares, nucleótidos y enzimas. La levadura de la cerveza posee varios nutrientes, entre estos se encuentran las vitaminas del complejo B, la tiamina, niacina, riboflavina, piridoxina, ácido pantoténico, folato, la vitamina B12 y biotina, en cuanto a los minerales tiene el selenio y cromo. [57]

En 2017, se tuvo una producción de cerveza (en litros) de 2.189 millones siendo líder en el mercado de licores y bebidas del país, presentando un consumo anual de un millón de hectolitros. De esta manera la biomasa residual de esta industria tiene un gran potencial, ya que se presenta su disponibilidad y gracias a su composición tiene la posibilidad de ser usado para otros procesos, como biocombustibles líquidos y gaseosos, como sustrato para la obtención de compuestos bioactivos, antioxidantes, monosacáridos, oligosacáridos, xilitol, arabitol, ácidos orgánicos, proteínas, y lípidos, entre otros productos de alto valor agregado. [56]

## **2.7 Industria del café**

En el proceso de cultivo e industrialización del café, solamente se aprovecha el 5% del peso del fruto fresco en la preparación de la bebida, el 95% restante está representado por residuos. Los principales subproductos que se generan en el proceso de beneficio e industrialización del fruto de café y en los procesos de renovación del cultivo son: la pulpa, el mucilago y la cascara de café, entre otros. [60]

Durante la etapa de despulpado del fruto se genera la pulpa del café y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco. Su producción media es de 2,25 toneladas frescas/ha-año, con una producción anual de aproximadamente 2 millones de toneladas. Uno de los compuestos presentes en la pulpa de café es la celulosa, con una proporción aproximada del 63%, como se puede observar en la Tabla 17. La pulpa de café posee una relación C/N de 31,43. [60] [61]

El mucilago, por otro lado, se genera en la etapa del desmucilaginado y, en base húmeda, representa alrededor del 14,85% del peso del fruto fresco. En términos de volumen, por cada kilogramo de café cereza sin seleccionar se producen 91 ml de mucilago fermentado. Su producción media es de 768 kg/ha-año que equivale a una producción anual aproximada de 650.000 toneladas de mucilago de café. En la Tabla 18 se muestra la composición química del mucilago del fruto de café, que tiene una relación C/N de 54,0. [62] [63]

**Tabla 17.***Composición química de la pulpa de café*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Celulosa	63,0 ± 2,5
Hemicelulosa	11,5 ± 2,0
Lignina	17,5 ± 2,2
Proteína	11,5 ± 2,0
Lípidos	2,0 ± 2,6
Fibras totales	60,5 ± 2,9
Polifenoles totales	1,5 ± 1,5
Azúcares totales	14,4 ± 14,4
Sustancias pépticas	6,5 ± 1,0
Taninos	3,0 ± 5,0
Ácido clorogénico	2,4 ± 1,0
Cafeína	1,5 ± 1,0

*Nota.* En esta tabla se muestra la composición química de la pulpa de café. Tomado de: M. Días, “Aproveitamento De Resíduos Do Processamento De Café Para Produção De Carotenoides Por Leveduras E Bactérias,” p. 122, 2016, [Online] Disponible: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8444>.

**Tabla 18.**

*Composición química del mucilago de café*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Sustancias pécticas totales	35,8
Pectina	5,70
Carbohidratos totales	50,00
Azúcares reductores	30,00
Azúcares no reductores	20,00
Nitrógeno	0,95
Proteína	5,95
Acidez	4,56
Ceniza	4,10

*Nota.* En esta tabla se muestra la composición química del mucilago de café. Tomado de: A. Samayoa, B. Borrayo, A. Pérez, M. María, and L. Montenegro, “Extracción de mucilago, azúcares, y taninos de la pulpa del café y producción de ácido acético comercial a partir de las mieles del café,” p. 78, 2014, [Online] Disponible: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06\\_3706.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3706.pdf).

## **2.8 Matriz PUGH: selección del residuo agroindustrial**

Para desarrollar la matriz PUGH el primer paso consiste en realizar una identificación de los criterios que serán evaluados, estos son básicamente las necesidades del cliente, que en este caso son las necesidades del proceso y están ubicados normalmente como filas pertenecientes a la matriz. A continuación, se debe especificar los probables conceptos de diseño, en esta ocasión son las alternativas de residuos agroindustriales a usar como sustrato, que apunten al cumplimiento de los criterios definidos, estos aparecerán en las columnas de la matriz. Habiendo aclarado lo anterior, en la Tabla 19 se muestra la numeración asignada a cada uno de los residuos agroindustriales revisados anteriormente. [66]

Por otro lado, los criterios a evaluar que se consideraron para la selección del residuo agroindustrial fueron los siguientes: tipos de carbohidratos presentes en el residuo; relación carbono – nitrógeno (C/N) de los residuos y cantidad de residuo desechada anualmente, para estos se van a tener tres

valoraciones: 1, 0 y -1, en donde 1 representa el aspecto más viable para la producción; 0 el aspecto que presenta equivalencia entre sus ventajas y desventajas para la producción; y por último, -1 que representa el aspecto menos viable para la producción.

Para los tipos de carbohidratos presentes en el residuo se estableció que para la valoración de 1 se tienen los azúcares simples como la glucosa, almidón, sacarosa, celobiosa, galactosa, fructosa y lactosa; para la valoración de 0 se tiene los azúcares como la pectina, xilosa, celulosa y hemicelulosa; y para la valoración de -1 se tiene la lignina, esto ya que, según la literatura, la glucosa, la sacarosa y otros azúcares simples han sido los sustratos fermentables más estudiados a escala laboratorio, mientras que algunos azúcares complejos no son ideales para la producción de hidrógeno por fermentación oscura debido a sus estructuras complejas, por ejemplo, los residuos constituidos por material lignocelulósico, no pueden ser usados por los microorganismos directamente, por lo tanto, se requiere de un pretratamiento para convertir la celulosa de su forma compleja a carbohidratos con formas más simples. [67] [68] [69]

Para la relación C/N del residuo se estableció que, para la valoración de 1 se tiene el rango entre 40 – 50; para la valoración de 0 menores a 40; y para la valoración de -1 mayores a 50, esto ya que, según la literatura, se ha reportado que relaciones extremas pueden crear considerables efectos negativos en la producción de biohidrógeno, mientras que otros autores indicaron que la producción de biogás aumentaba a medida que la relación C/N se incrementaba de 40 a 140, disminuyendo a valores más altos de C/N, igualmente en estudios adicionales se recomiendan relaciones C/N de 20:1 – 30:1 para el crecimiento apropiado de las células de los microorganismos y sus reacciones metabólicas, a diferencia de otros estudios en los que se ha reportado que los mayores rendimientos de producción de hidrógeno están alrededor de una relación C/N de 47 y con valores mayores a 50 la producción disminuía drásticamente a pesar de mantenerse prácticamente constante la velocidad de producción de hidrógeno, adicionalmente se señaló que una relación C/N baja podría conducir a la formación de amoníaco en grandes cantidades, debido a la acumulación de nitrato durante la desnitrificación biológica, que es tóxica para los microorganismos. [70] [71] [72] [73] [74]

**Tabla 19.***Numeración de los residuos agroindustriales*

<b>Agroindustria</b>	<b>Nombre del residuo</b>	<b>No</b>
Industria arrocera	Cascarilla de arroz	1
Industria de chocolates y derivados	Cascara de mazorca de cacao	2
	Mucílago	3
	Cascarilla del grano de cacao	4
Industria azucarera	Cogollo de caña de azúcar	5
	Bagazo de caña de azúcar	6
Industria de procesados de papa, plátano y yuca	Papa	7
	Cáscara de papa	8
	Plátano	9
	Cáscara de plátano	10
	Yuca	11
Industria de lácteos	Cascara de yuca	12
	Lactosuero	13
Industria cervecera	Raicilla de la malta	14
	Bagazo de cerveza	15
Industria del café	Pulpa de café	16
	Mucilago de café	17

*Nota.* En esta tabla se muestra la numeración asignada a los residuos agroindustriales consultados. Elaboración propia.

Por último, para la cantidad de residuo desechada se estableció que para la valoración de 1 se tienen valores mayores a 150.000 toneladas por año; para la valoración de 0 se tienen los valores entre 50.000 y 150.000 toneladas por año; y para la valoración de -1 se tienen los valores menores a 50.000 toneladas por año, estas valoraciones fueron determinadas por consideración propia, ya que se desea garantizar que la propuesta de producción de hidrógeno sea la de un proceso rentable y sostenible. La valoración de los criterios de selección del residuo se puede observar en la Tabla 20.

**Tabla 20.***Criterios de selección de los residuos agroindustriales*

	Valoración asignada			
	1	0	-1	
Criterios	Tipos de carbohidratos*	Glucosa, almidón, sacarosa, celobiosa, galactosa, fructosa, lactosa	Pectina, Xilosa, Celulosa, Hemicelulosa	Lignina
	Relación C/N	40-50	<40	>50
	Cantidad de residuo desechada	>150.000 ton/año	[50.000 – 150.000] ton/año	<50.000 ton/año

*Nota.* En esta tabla se muestran los criterios utilizados para la selección del residuo agroindustrial y la valoración respectiva de acuerdo a su valor. Elaboración propia. \* Para residuos con una combinación de azúcares de la categoría 1 y 0 la valoración será de 1; para una combinación de azúcares de las tres categorías (o de las categorías 1 y -1) la valoración será de 0; y para una combinación de las categorías 0 y -1 la valoración será de -1.

Como se puede observar en la Tabla 21 después de aplicar los criterios de selección, cuatro residuos dieron la valoración de 2 como resultado final, estos residuos son: 2, cáscara de mazorca de cacao; 5, cogollo de caña de azúcar; 7, papa; y 12, cáscara de yuca, por lo que se debe llevar a cabo una selección final del residuo, para la que se tomó la relación C/N como criterio de selección final, esto, ya que se consideró la importancia que tiene este parámetro en la estabilización del proceso biológico, además de que la concentración de nitrógeno (que se detalla por la relación C/N) juega un papel importante en la producción fermentativa de hidrógeno, pues el nitrógeno es parte de las proteínas, ácidos nucleicos y enzimas que son responsables del crecimiento de las bacterias; un exceso de nitrógeno puede inhibir la producción de hidrógeno debido a los cambios en la estructura microbiana y el consiguiente desplazamiento de la ruta metabólica, mientras que concentraciones bajas de nitrógeno pueden comprometer el crecimiento de las células. [9] [73]

En vista de lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta que el rango ideal de la relación C/N para la producción de hidrógeno esta entre 40-50, la selección se reduce a dos residuos (5 y 12), ya que son estos cuya relación C/N se encuentra dentro del rango y por consiguiente tienen la valoración de 1 para este criterio, como se puede observar en la Tabla 22.

**Tabla 21.***Determinación del residuo agroindustrial*

<b>Criterio</b>	<b>Residuo agroindustrial</b>																
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
Tipos de carbohidratos	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
Relación C/N	-1	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1
Cantidad de residuo desechada	1	1	-1	-1	1	1	1	0	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
Suma de positivos (+)	1	2	1	0	2	1	2	1	1	0	1	2	0	0	0	1	2
Suma de negativos (-)	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
Suma general	0	2	0	-1	2	0	2	1	0	-1	0	2	-1	-1	-1	1	1

*Nota.* En esta tabla se muestran las valoraciones asignadas según el criterio a la característica de cada residuo y la valoración final para cada uno de estos. Elaboración propia.

**Tabla 22.***Determinación final del residuo agroindustrial*

<b>Criterio</b>	<b>Residuo agroindustrial</b>			
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>12</b>
Relación C/N	0	1	0	1

*Nota.* En esta tabla se muestran la relación C/N de los residuos preseleccionados anteriormente. Elaboración propia.

De esta manera al reducir las opciones de los residuos, se busca aquel cuya relación C/N tenga un valor más cercano a 47, esto para garantizar una mayor producción de hidrógeno, debido a que los valores inferiores a 47 provocan una disminución mayor en su producción mientras que los valores superiores a 47 no provocan cambios tan notorios, aclarando que se debe mantener en el rango

establecido anteriormente (relación C/N de 40 a 50). Siendo así y teniendo en cuenta que los valores de la relación C/N del cogollo de la caña de azúcar y de la cascara de yuca son respectivamente 49 y 44,82, se selecciona el cogollo de la caña de azúcar como el residuo agroindustrial con el cual se llevara a cabo la producción de hidrógeno.

El cogollo de caña de azúcar tiene, como se mencionó anteriormente, una relación C/N de 49, una producción aproximada de 375.000 ton/año, valores que representan los aspectos más viables para la producción, y una composición química que incluye la celulosa, hemicelulosa y lignina, carbohidratos que según lo establecido anteriormente son aspectos que representan ya sea equivalencia entres en sus ventajas y desventajas, en el caso de la celulosa y hemicelulosa, o menos viabilidad para la producción, en el caso de la lignina, sin embargo, ya realizada la selección de este residuo, esto no representa un obstáculo para la producción ya que se puede hacer uso de diferentes métodos y operación para aprovechar esta característica del cogollo de caña de azúcar, como se puede detallar más adelante en la sección del diseño conceptual del proceso. [29] [30]

### 3. SELECCIÓN DEL CONJUNTO DE MICROORGANISMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Con el fin de determinar el conjunto de microorganismos que se van a utilizar para la producción de hidrógeno, en este capítulo se presenta la información resultante de la revisión bibliográfica realizada en cuanto a los microorganismos que producen hidrógeno. Además, se especificarán las condiciones de operación para el crecimiento del microorganismo y la producción de hidrógeno.

Principalmente, se realizó una recopilación de artículos y documentos en los cuales se investigará sobre la producción de hidrógeno a partir de microorganismos, a partir de los cuales se obtuvo el listado de microorganismos, mostrado en la Tabla 23 con las respectivas referencias en las cuales cada microorganismo es mencionado. Posteriormente, se detallarán las características de cada microorganismo en específico.

**Tabla 23.**

*Listado de microorganismos*

N°	Microorganismo	Referencias
1	<i>Enterobacter aerogenes</i>	[75] [9] [76]
2	<i>Enterobacter cloacae</i>	[75] [9] [76]
3	<i>Escherichia coli</i>	[75] [9] [77] [76]
4	<i>Clostridium butyricum</i>	[75] [78] [9] [79] [76]
5	<i>Clostridium pasteurianum</i>	[75] [80] [77]
6	<i>Clostridium beijerinckii</i>	[9] [76] [81]
7	<i>Thermotoga neapolitana</i>	[82] [9] [76]
8	<i>Thermotoga marítima</i>	[82] [9]
9	<i>Clostridium saccharoperbutylaceticum</i>	[78] [9]
10	<i>Thermotoga elfii</i>	[9]
11	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	[9] [76] [81]
12	<i>Clostridium thermocellum</i>	[83]

**Nota.** En esta tabla se muestra el listado de microorganismos a evaluar con las referencias en las que cada uno es mencionado. Elaboración propia.

### 3.1 *Enterobacter aerogenes*

*Enterobacter* es un género de bacterias gramnegativas comunes, anaerobias facultativas, con forma de bastoncillo y no formadoras de esporas que pertenecen a la familia *Enterobacteriaceae*. La especie *Enterobacter aerogenes* originalmente fue nombrada *Aerobacter aerogenes* y luego fue incluida en el género *Enterobacter* en 1960. En 1971, se propuso cambiar el nombre de esta especie a *Klebsiella mobilis* debido a su movilidad conferida por flagelos peritricos y su relación genética con el género *Klebsiella*. [84]

En primer lugar, las *Enterobacter* son compatibles con las características generales de la familia *Enterobacteriaceae*. Las células son bastones rectos gramnegativas capaces de fermentar la glucosa para la producción de ácidos y gases. La mayoría de las cepas crecen en una amplia gama de diferentes azúcares y derivados del azúcar como su única fuente de carbono y energía. Y utiliza estos sustratos para la producción de hidrógeno a través de fermentación oscura. [85] [86]

Por otro lado, las bacterias del género *Klebsiella* tienden a ser más cortas y gruesas en comparación con otras de la familia *Enterobacteriaceae*, las células tienen forma de bastones y generalmente miden 0.3 - 1.5  $\mu\text{m}$  de ancho por 0.5 – 5.0  $\mu\text{m}$  de largo. Pueden ser encontrados individualmente, en pares, en cadenas o unidos de extremo a extremo. *Klebsiella* puede crecer en medios de laboratorio ordinario y no tiene requisitos de crecimiento especiales, como los otros miembros de *Enterobacteriaceae*. Su temperatura de crecimiento ideal es de 35 – 37 °C mientras que su nivel de pH ideal es de aproximadamente 7.2. Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 1,1 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [87] [9]

### 3.2 *Enterobacter cloacae*

Al igual que la bacteria *Enterobacter aerogenes*, la *Enterobacter cloacae* pertenece a la familia *Enterobacteriaceae* del género *Enterobacter*, que son bacterias gramnegativas, anaerobias facultativas y con forma de bastoncillo no formadoras de esporas. [84]

La *Enterobacter cloacae* se ubica en ambientes terrestres y acuáticos (agua, aguas residuales, suelo y alimentos). La especie se presenta como microflora en el tracto intestinal de humanos y animales y también es patógenas en plantas e insectos. Esta diversidad de hábitats se refleja en la variedad genética de *E. cloacae* y junto con las demás bacterias del género *Enterobacter* es capaz de

fermentar la glucosa para la producción de ácidos y gases y produce hidrógeno a través de fermentación oscura utilizando diferentes fuentes de carbono. Este microorganismo es una bacteria establecida productora de hidrógeno y su crecimiento se ha estudiado a una temperatura de 37 °C con un pH de 5,5 – 7,5, con un valor óptimo de 6,5. Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 3,3 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [84] [88] [4]

### **3.3 Escherichia coli**

*Escherichia coli* son microorganismos típicamente gramnegativos, en forma de varilla (bacilos de 2.0 – 6.0 µm de longitud y 1.1 – 1.5 µm de ancho) con extremos redondeados. Sin embargo, la forma real de estas bacterias varía desde células esféricas (cocos) hasta bastones alargados o filamentosos. La *Escherichia coli* no forma esporas y suelen ser móviles mediante la acción de flagelos peritricos. Estas bacterias son facultativamente anaeróbicas, producen gas a partir de la fermentación oscura de carbohidratos y pueden crecer en un rango de temperatura entre 15 y 45 °C. [89] [9] [90]

Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 2,0 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [9]

### **3.4 Clostridium butyricum**

Se atribuye un papel importante a las bacterias del género *Clostridium* ya que son microorganismos con numerosas aplicaciones en varias ramas de la industria. El género *Clostridium* es uno de los más grandes del reino procariota. Estas son bacterias heterogénicas anaerobias, típicamente grampositivas. Su característica distintiva es una forma cilíndrica. Las células de bacterias del género *Clostridium* son ciliadas, móviles y capaces de formar endosporas. Para la mayoría de las especies, la temperatura óptima de crecimiento cae dentro del rango de 30 – 40 °C, mientras que el pH óptimo está contenido en el rango de 6.5 – 7.5. [91]

*Clostridium butyricum* es un bacilo estrictamente anaeróbico, grampositivo, que forma esporas, llamado así por su capacidad para producir altas cantidades de ácido butírico. *C. butyricum* es un tipo de bacteria intestinal normal en los seres humanos, que, con las crecientes exploraciones de la producción de hidrógeno fermentativo, ha sido ampliamente detectada o utilizada tanto en sistemas de fermentación de cultivos mixtos como de cultivos puros. La revisión de la literatura

muestra que los carbohidratos como la glucosa, la fructosa, la lactosa, la xilosa, el almidón y el glicerol pueden ser utilizados para la producción de hidrógeno por *C. butyricum* a través de fermentación oscura. Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 2,28 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [9] [81] [92] [93]

### **3.5 Clostridium pasteurianum**

Al igual que la bacteria *Clostridium butyricum*, la *Clostridium pasteurianum* pertenece al género *Clostridium*, que son bacterias en forma de bastón, generalmente grampositivas, comúnmente encontradas en la naturaleza, los principales hábitats de estas bacterias son el suelo, los lodos de río, los lodos activos, los excrementos de animales, entre otros. [91]

Las bacterias del género *Clostridium* se caracterizan por un metabolismo intensivo de fermentación. Pueden utilizar numerosos compuestos orgánicos como fuente de carbono y nitrógeno. Los productos de su metabolismo incluyen dióxido de carbono, hidrógeno, así como compuestos orgánicos (ácido butírico, láctico, acético y succínico) y disolventes (butanol, acetona, isopropanol) los cuales se obtienen a través del mecanismo de fermentación oscura. [91] [94]

Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 1,19 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [95]

### **3.6 Clostridium beijerincki**

*Clostridium beijerinckii* son bacterias anaerobias estrictas, Gram positiva, mesófilas específicamente crecen a una temperatura óptima de 37°C, presenta forma de bacilo, poseen flagelo y pertenece a la familia *Clostridiaceae*, son bacterias sacarolíticas, es decir, que fermentan los carbohidratos simples y como productos generan butirato (AGV), acetato, dióxido de carbono, lactato, gas hidrógeno, acetona, etanol, acetilmetilcarbonilo y butanol. Estos productos los obtienen por medio de una fermentación oscura. [96]

Por la formación de disolventes como el butanol y la acetona, es un microorganismo usado en la biotecnología, además su crecimiento lo hace en medios sencillos y resultan muy económicos para trabajar en la industria. Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 2,54 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [96] [97]

### **3.7 Thermotoga neapolitana**

*Thermotoga neapolitana* son bacterias anaerobias estrictas Gram negativas, pertenecen al género *Thermotogales*, y son hipertermófilas, es decir, que crecen a temperaturas dentro del rango de 55 a 90°C con una temperatura óptima de crecimiento de 80°C y un pH óptimo de 7 para un crecimiento máximo, son células inmóviles, no esporulantes y tienen forma de bacilo. [98]

Es un organismo que produce altas cantidades de hidrógeno en cultivos discontinuos, es decir en procesos Batch, los cuales usa carbohidratos desechados como sustrato para su producción industrial, además produce enzimas termoestables las cuales también se usan con fines industriales. Se han registrado numerosos documentos donde indican la producción de hidrógeno por medio de producción quimiotrófica y por fermentación oscura alcanzando rendimientos cercanos al teórico, aproximadamente de 3,5 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [98] [99]

### **3.8 Thermotoga maritima**

*Thermotoga maritima* son bacterias anaerobias estrictas Gram negativas, aislada originalmente en sedimentos marinos calentados de manera geotérmica, son bacterias hipertermófilas y crecen en temperaturas entre el rango de 55 a 90°C con una temperatura de crecimiento óptimo de 80°C, son células no esporulantes con forma de bacilo, esta especie pertenece al género *Thermogales* al igual que la *T. neapolitana* y presenta características similares al implementar [FeFe] hidrogenasa, una enzima que cataliza la formación de hidrógeno por fermentación oscura de diferentes tipos de carbohidratos, por último, esta especie tiene una mayor diversidad metabólica por su capacidad para fermentar tanto monosacáridos como polisacáridos. [100]

Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 1,7 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [101]

### **3.9 Clostridium saccharoperbutylaceticum**

*Clostridium saccharoperbutylaceticum* son bacterias anaerobias estricta, son mesófilas con una temperatura de crecimiento óptima de 30°C y un pH óptimo de 6, además son formadora de esporas; esta especie se aisló inicialmente en el suelo y es comúnmente una de las bacterias industriales más importantes ya que es usada en la producción de acetona, butanol y etanol (ABE),

a pesar de tener menos estudios en la producción de hidrógeno esta generalmente la realiza por fermentación oscura a partir de glucosa como sustrato. [102]

Inicialmente esta cepa se aisló en 1959 en Japón y al ser bacterias hiperproductoras de butanol se han utilizado en la producción industrial de este metabolito desde entonces, el biobutanol es producido a través de la fermentación de acetona-butanol-etanol (ABE) y posee mejores propiedades en comparación del etanol como fuente de combustible y se considera como un biocombustible favorable para el futuro. Además, el butanol es una materia prima importante para numerosos procesos industriales. [103]

La mayoría de sus estudios se centran en sus características de fermentación, incluyendo los medios y las respectivas condiciones para que se dé una fermentación deseable. A pesar que la producción de hidrógeno no ha sido bien estudiado, se han encontrado ciertos estudios donde muestran su rendimiento como lo es el estudio realizado por la Asociación Internacional para la Energía del Hidrógeno, en donde se encontró un rendimiento aproximado de producción de 3,1 mol por mol de glucosa cuando se comenzó con una concentración inicial de glucosa de 10 g/L, un pH de 6,0 y a una temperatura de 37 °C. [103] [104]

Además, se indicó que la producción disminuyó cuando se aplicaron mayores concentraciones iniciales de glucosa. Los procesos de obtención de hidrógeno los realizan por medio de procesos Batch o discontinuos y los parámetros por los cuales se puede ver afectada son la concentración de glucosa, pH inicial y la temperatura. Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 2,5 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [104] [9]

### **3.10 *Thermotoga elfii***

*Thermotoga elfii* es una bacteria anaerobia estricta Gram negativo, se aisló inicialmente en un pozo petrolífero africano en 1995, es termófila y su temperatura de crecimiento óptimo es de 66°C, su pH óptimo es de 7,5. Posee una vaina exterior protectora que le da la característica de protegerlo del calor extremo; presenta forma de bacilo mide entre 0,5 y micrómetros y su movilidad la realiza por medio de flagelos ubicados alrededor de todo su cuerpo lo que lo hace una bacteria peritricosa. Esta especie del género *Thermotoga* crece en ambientes ricos en carbohidratos como la glucosa,

fructosa, lactosa, ribosa, sacarosa, maltosa, tiosulfato y xilosa de los cuales recibe electrones, y por medio de fermentación produce acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. [105] [106]

Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 3,3 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [107]

### **3.11 Clostridium acetobutylicum**

*Clostridium acetobutylicum* es un bacilo anaerobia Gram Positiva, generalmente habita en el suelo, son bacterias mesófilas con una temperatura de crecimiento óptima entre 10 a 65 °C, además, son organismos sacarolíticas es decir que puede descomponer el azúcar con el objetivo de producir acetona, etanol y butanol (ABE). Su movilidad la realiza por medio de flagelos que se encuentran alrededor de toda su superficie, forman endosporas que les permite tener una resistencia al calor y por último presentan un metabolismo de fermentación anaeróbico obligado. Se obtuvo de la American Type Culture Collection (ATCC). [108]

Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 1,5 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [9]

### **3.12 Clostridium thermocellum**

*Clostridium thermocellum* es una bacteria termófila, anaerobia y celulítica con capacidad de producir etanol por medio de una fermentación directa usando sustratos celulósicos complejos. Es un bacilo Gram Negativo, posee una espora terminal y utiliza la celulosa como su única fuente de carbono, sin embargo, han sido de estudio la posibilidad de fermentar otros azúcares y generar otros productos. [109]

Como se mencionó anteriormente, *C. thermocellum* es capaz de metabolizar y crecer a partir de sustratos como la celulosa, hemicelulosa, xilosa y celobiosa, pero no se ha reportado a partir de glucosa, fructosa, entre otros carbohidratos. Como productos de la fermentación se obtiene principalmente etanol y como subproductos se tiene H<sub>2</sub>, ácido láctico, CO<sub>2</sub> y ácido acético. [109]

*Clostridium thermocellum* es uno de los microorganismos más eficientes en la degradación de celulosa que se han aislado hasta la actualidad, ya que tienen la capacidad de solubilizar rápidamente la celulosa, debido a que presentan un complejo especializado de celulosa

multienzimática llamada celulosoma. Además, es un organismo prometedor para la aplicación del Bioprosesamiento Consolidado (CPB) es decir, que realizan la fermentación en un solo paso a partir de componentes lignocelulósicos y de esta manera se puede reducir los costos anuales en su producción. Se ha registrado que el rendimiento en producción de hidrógeno con este microorganismo es de 1,67 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [109] [110]

Adicionalmente, se realiza una recopilación de los rendimientos de la producción de hidrógeno de los microorganismos, que se muestra en la Tabla 24.

**Tabla 24.**

*Rendimiento de producción de hidrógeno de los microorganismos*

N°	Microorganismo	Rendimiento de producción de hidrógeno
1	<i>Enterobacter aerogenes</i>	1,1 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [9]
2	<i>Enterobacter cloacae</i>	3,3 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [9]
3	<i>Escherichia coli</i>	2,0 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [9]
4	<i>Clostridium butyricum</i>	2,28 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [93]
5	<i>Clostridium pasteurianum</i>	1,19 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [95]
6	<i>Clostridium beijerinckii</i>	2,54 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [97]
7	<i>Thermotoga neapolitana</i>	3,5 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [99]
8	<i>Thermotoga marítima</i>	1,7 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [101]
9	<i>Clostridium saccharoperbutylaceticum</i>	2,5 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [9]
10	<i>Thermotoga elfii</i>	3,3 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [107]
11	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	1,5 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [9]
12	<i>Clostridium thermocellum</i>	1,67 mol H <sub>2</sub> /mol glucosa [110]

**Nota.** Esta tabla muestra los rendimientos de producción de hidrógeno reportados de los microorganismos. Elaboración propia.

### 3.13 Matriz PUGH: selección del microorganismo

Para realizar la selección del conjunto de microorganismos a utilizar para metabolizar el sustrato seleccionada y la producción de biohidrógeno se usará la matriz PUGH, con el mismo

procedimiento aplicado para la selección del residuo agroindustrial, con cambio en los criterios de selección, mostrados en la Tabla 25.

**Tabla 25.**

*Criterios de selección del microorganismo*

		<b>Valoración asignada</b>		
		1	0	-1
<b>Criterios</b>	Temperatura óptima de crecimiento	Mesófilos	Termófilos	Psicrófilos, hipertermófilos
	Tipo de respiración celular	Anaerobio Facultativo	Anaerobio estricto	Aerobio
	Rendimiento de producción de hidrógeno	[>2 - 4] mol $H_2$ /mol glucosa	[1-2] mol $H_2$ /mol glucosa	<1 mol $H_2$ /mol glucosa

*Nota.* En esta tabla se muestran los criterios utilizados para la selección del microorganismo y la valoración respectiva de acuerdo a su valor. Elaboración propia.

Para la determinación de los criterios se establecieron de la siguiente manera: al implementar una fermentación oscura los microorganismos aptos para la producción del hidrógeno pueden operar en ambientes mesófilos (25-40°C) y termófilos (50-60°C), al ser la temperatura vulnerable a cambios por diversos factores como el tipo de operación, de reactor y la adaptación del cultivo se implementó una valoración de 1 para mesófilos, ya que su condición de operación tiene valores cercanos a un temperatura ideal, es decir 35°C, una valoración de 0 para termófilos, puesto que para mantener estas temperaturas se necesita de un mayor gasto energético y una valoración de -1 para psicrófilos e hipertermófilos ya que a estas temperaturas se obtiene un bajo rendimiento de hidrógeno. [111] [112]

En cuanto al tipo de respiración celular se estableció la valoración de 1 para anaerobio facultativo, estas especies pueden consumir las bajas cantidades de oxígeno que se pueda presentar en los biorreactores y así, garantizar una anaerobiosis, la valoración de 0 para especies anaerobias estrictas y una valoración de -1 para especies anaerobias, ya que se presentan bajos rendimientos en presencia de altas concentraciones de oxígeno. [113]

Por último, en cuanto al rendimiento en la producción de hidrógeno por fermentación oscura se tiene presente el límite teórico que se puede alcanzar, llamado Límite de Thauer, el cual establece que se pueden producir 4 mol de H<sub>2</sub> por 1 mol de glucosa consumida durante la fermentación, este parámetro, junto con una aproximación a la media de los rendimientos de producción de hidrógeno de los microorganismos, mostrados en la Tabla 24, ayuda a establecer el límite superior y los rangos de la valoración de este criterio de selección. Por lo tanto, se estableció una valoración de 1 para rendimientos mayores a 2 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa hasta el límite teórico, una valoración de 0 para rendimientos entre 1 y 2 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa y una valoración de -1 para rendimientos menores a 1 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. [99]

Como se puede observar en la Tabla 26, después de aplicar los criterios de selección, se determina que el microorganismo con el cual se llevara a cabo la producción de hidrógeno es la bacteria *Enterobacter cloacae*.

**Tabla 26.**

*Determinación del microorganismo*

Criterio	Microorganismos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura de crecimiento óptima	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	0	1	0
Tipo de respiración celular	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rendimiento de producción de hidrógeno	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
Suma de positivos (+)	2	3	2	2	1	2	1	0	2	1	1	0
Suma de negativos (-)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Suma general	2	3	2	2	1	2	0	-1	2	1	1	0

*Nota.* En esta tabla se muestran las valoraciones asignadas según el criterio a la característica de cada microorganismo y la valoración final para cada uno de estos. Elaboración propia.

La *E. cloacae* pertenece a la familia *Enterobacteriaceae* del género *Enterobacter*, es una bacteria gramnegativa, anaerobia facultativa, capaz de fermentar la glucosa para la producción de ácidos y

gases. Es una bacteria establecida productora de hidrógeno a través de fermentación oscura utilizando diferentes fuentes de carbono y su crecimiento se ha estudiado a una temperatura de 37 °C con un rango de pH de 5,5 – 7,5, con un valor óptimo de 6,5 y un rendimiento de producción de hidrógeno de 3,3 mol H<sub>2</sub>/mol glucosa. Todas las características mencionadas de este microorganismo corresponden, según lo establecido anteriormente a los aspectos más viables para la producción de hidrógeno, explicándose así su selección. [84] [88] [4]

Según lo anterior, a continuación, se detallan las condiciones de operación del proceso respecto a la operación del microorganismo: la producción de hidrógeno se llevará a cabo en un proceso semi-batch, debido a que se debe retirar continuamente el hidrógeno del biorreactor para que la presión parcial de este no afecte su producción, con una operación anaerobia a una temperatura de 37 °C y un pH controlado de 6,5, además, teniendo en cuenta que el microorganismo seleccionado es anaerobio facultativo no se necesita de un control demasiado estricto de la presencia de oxígeno en el biorreactor, lo que representa una ventaja para el proceso.

## **4. DISEÑO CONCEPTUAL PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR FERMENTACIÓN OSCURA**

Con el fin de determinar el diseño conceptual para la producción de hidrógeno, para su utilización como combustible para automóviles, por fermentación oscura con el sustrato y microorganismo seleccionado, en este capítulo se presenta la información relacionada con el acondicionamiento o pretratamiento del sustrato para que pueda ser metabolizado por el microorganismo, el biorreactor con las condiciones adecuadas para el crecimiento del microorganismo y la producción de hidrógeno, y finalmente los procesos de separación para obtener el producto de interés con cierto porcentaje de pureza junto con el almacenamiento del mismo.

### **4.1 Parámetros iniciales**

Principalmente se realiza una recopilación de los datos relacionados con el residuo a ser utilizado como sustrato, que se pueden visualizar en la Tabla 27, y las características del microorganismo que se va a utilizar para la producción de hidrógeno, que se pueden ver en la Tabla 28.

Adicionalmente, para determinar la capacidad operativa del proceso, se tomaron los tres principales departamentos productores de caña de azúcar: Valle del Cauca, Cauca y Meta, con los cuales se realizó una matriz de selección de ubicación para establecer el departamento en el cual se va a proponer el proceso de producción de hidrógeno, para esto se evaluaron diferentes aspectos, como se puede ver en la Tabla 29, a los cuales se les asignó un valor para cada uno de los departamentos con una ponderación de 1 a 5, donde 1 corresponde a la consideración más desfavorable y 5 a la consideración más favorable, teniendo en cuenta que todos los parámetros fueron considerados con la misma importancia respecto al total. [114]

**Tabla 27.***Características del sustrato*

<b>Parámetro</b>	<b>Cogollo de la caña de azúcar</b>
Materia Seca (%)	25,0
Humedad (%)	75,0
Celulosa (%)	40,3
Hemicelulosa (%)	23,7
Lignina (%)	4,2
Ceniza (%)	6,4
Fibra cruda (%)	28,3
Calcio (%)	0,3
Fósforo (%)	0,2
Potasio (%)	2,1
Relación C/N	49/1

*Nota.* En esta tabla se muestran las características del residuo a utilizar con sustrato para la producción de hidrógeno. Tomado de: E. Lagos and E. Castro, “Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes,” *Agron. Mesoam.*, vol. 30, no. 3, pp. 917–933, 2019. | T. Ray, “Relación-carbono-nitrógeno-en-compostas.” 2018.

**Tabla 28.**

*Características del microorganismo*

Microorganismo	<i>Enterobacter cloacae</i>
Temperatura óptima de crecimiento	37°C
Tipo de respiración	Anaerobia facultativa
pH óptimo de crecimiento	6,5

*Nota.* En esta tabla se muestran las características del microorganismo a utilizar para la producción de hidrógeno. Elaboración propia. Datos tomados de: A. Davin-Regli and J. M. Pagès, “Enterobacter aerogenes and Enterobacter cloacae; Versatile bacterial pathogens confronting antibiotic treatment,” *Front. Microbiol.*, vol. 6, no. MAY, pp. 1–10, 2015, doi: 10.3389/fmicb.2015.00392. | N. Khanna, S. M. Kotay, J. J. Gilbert, and D. Das, “Improvement of biohydrogen production by Enterobacter cloacae IIT-BT 08 under regulated pH,” *J. Biotechnol.*, vol. 152, no. 1–2, pp. 9–15, 2011, doi: 10.1016/j.jbiotec.2010.12.014.

Según la valoración mostrada en la Tabla 29, el departamento con las condiciones más favorables para la propuesta de producción de hidrógeno es Valle del Cauca, la producción promedio en los años 2012-2017 fue de 24 millones de toneladas, la producción promedio en este departamento equivale al 80% es decir, produjo 19'200.000 miles de toneladas de caña de azúcar, teniendo en cuenta un 7,5% de residuos de cogollo aproximadamente se tienen 1'440.000 toneladas de cogollo de caña de azúcar anuales, dato respecto al cual se establece un procesamiento del 10% de este residuo, es decir que la producción de hidrógeno se realizara a partir de 144.000 toneladas de cogollo de caña de azúcar anuales. [29] [114]

**Tabla 29.***Parámetros, información y valoración para la selección del departamento*

Parámetros	Aspecto a evaluar	Valle	Puntaje	Cauca	Puntaje	Meta	Puntaje
		del Cauca					
Materias primas	Área sembrada	75%	5	18%	4	5%	3
Producción nacional	Producción promedio	80%	5	19%	4	1%	3
Transporte	Infraestructura vial (red vial en km)	794,1	4	1278,63	5	584,89	3
	Servicios	Electricidad (\$/kWh)	466,98	5	466,98	5	525,83
Clima	Temperatura promedio	27°C	4	26°C	3	30°C	5
	Humedad relativa	70%	4	80%	5	80%	5
<b>Total</b>			<b>27</b>		<b>26</b>		<b>23</b>

**Nota.** Esta tabla muestra los parámetros evaluados y la información según cada departamento junto con los valores asignados a cada aspecto para la selección del departamento. Elaboración propia. Datos tomados de: FINAGRO, “Ficha de inteligencia Caña de Azúcar,” pp. 1–14, 2018, [Online] Disponible: [https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha\\_cana\\_de\\_azucar\\_version\\_ii.pdf](https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha_cana_de_azucar_version_ii.pdf). | Invias, “Estado de la red vial.”. | DatosMundial, “El mundo en números.” [Online] Disponible: <https://www.datosmundial.com/america/colombia/clima.php>. | Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible, Boletín Tarifario Contenido. 2020.

## 4.2 Pretratamiento

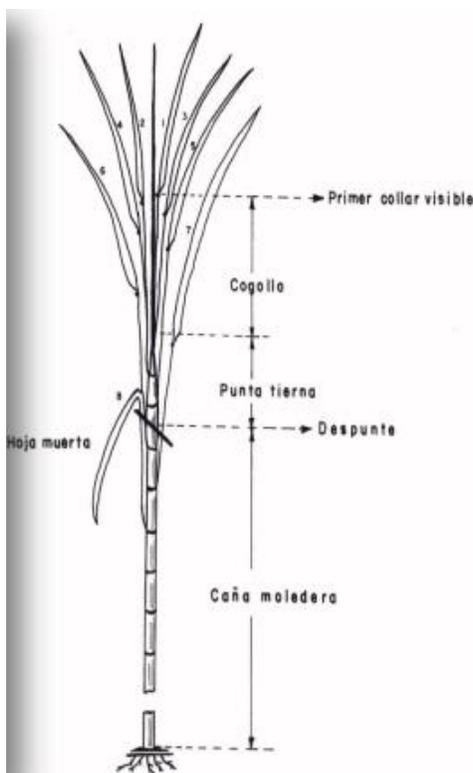
Teniendo en cuenta los carbohidratos presentes en el sustrato a utilizar (celulosa, hemicelulosa y lignina) como primer paso estos materiales complejos deben dividirse en sus partes constitutivas mediante una combinación de cambios químicos, mecánicos y enzimáticos. Este paso se denomina pretratamiento y se han probado muchas técnicas para hacer que la biomasa compleja este más

biodisponible para la conversión energética final, tales como: alta temperatura, pH alto o bajo, enzimas hidrolíticas, microondas, ultrasonidos, radiación y campos eléctricos pulsados. [118]

Para este caso ya que se tiene el cogollo de la caña de azúcar, que, como se puede ver en la Figura 1, corresponde a un material sólido, por lo que se propone para el proceso, primero: la adecuación de la materia prima con el lavado de esta, segundo: el pretratamiento que incluye la molienda e hidrólisis de la misma, con el fin de obtener está en un menor tamaño y en sus azúcares constituyentes y así facilitar su degradación en procesos posteriores por el microorganismo.

### **Figura 1.**

*Representación de la caña de azúcar*



*Nota.* La figura representa las respectivas partes de la caña de azúcar. Tomada de: B. O. T. Á. Nica and Y. Variedades, “Tecnología azucarera.”

#### **4.2.1 Lavado**

Para el acondicionamiento de la materia prima por medio del lavado de la misma, principalmente se realiza la conceptualización de los tipos de lavado existentes para la adecuación de materias

primas, y así seleccionar el adecuado para el proceso de producción de hidrógeno, dentro de los cuales se encuentran los siguientes:

- Lavado por aspersión es un método de lavado en el que la materia prima rota y se desplaza a través del lavador mientras es rociada con agua. Gracias a la presión y nivel con la que el agua cae sobre la materia prima los contaminantes se humectan y se arrastran con la misma. Este es un método de limpieza de alta eficacia que permite el ahorro de agua. No obstante, no es aconsejable para materias primas planas, blandas, que no puedan rotar o que tengan aristas agudas [120]
- Lavado por inmersión es un método en el que la materia prima es sumergida en un tanque con agua agitada a través de la inyección de aire a presión. De esta forma, se ablandan los contaminantes adheridos a la superficie de la materia prima (tierra, arena, barro, hojas, restos de insectos) que luego se desprenden y caen al fondo del tanque o se eliminan con el agua de lavado al quedar en suspensión. Este método se utiliza para la limpieza de materiales con superficies blandas que pueden lesionarse con facilidad y su eficacia depende de la cantidad de materia prima que se introduce en el lavador, del tiempo y temperatura de lavado y del caudal de renovación del agua. [120]
- Lavado por flotación es un método que se utiliza para separar contaminantes que se desprenden en el agua al humectarse y que, por diferencias de flotabilidad respecto a la materia prima, se van precipitando de forma selectiva en el fondo del lavador. La materia prima es empujada de un receptáculo al siguiente atravesando el lavador por flotación mientras que los contaminantes se desprenden y precipitan en el fondo del lavador. [120]

Según lo anterior, para el proceso se realiza un lavado por inmersión a la materia prima, ya que permite llevar a cabo un cuidadoso lavado de todo el material por medio de la adición de burbujas de aire y permite tener una mayor área de contacto entre el agua y la materia prima a lavar, tomando como referencia el equipo de lavado “Lavadora por inmersión” del fabricante Jiadi ®, en el que el producto se mueve en el lavador gracias al método de transporte hidráulico, la bomba que realiza la inyección de aire permite que la limpieza se lleve a cabo de manera exitosa sin que se dañe el material, luego, se realiza una limpieza por roció, además de poseer un diseño que permite juntar las impurezas en la parte inferior del lavador, cuenta con una capacidad de 20 ton, por lo que se necesitaría de un solo equipo para procesar las 400 ton/día (aproximadamente 16,66 ton/h) de

cogollo de caña de azúcar que entran al proceso, el equipo cuenta con las características mostradas en la Tabla 30. [121]

**Tabla 30.**

*Características del equipo de lavado*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo	JD-fx-20
Capacidad (ton)	20
Largo (m)	4,5
Ancho (m)	1
Altura (m)	1,4
Potencia (kW)	3,8

*Nota.* En esta tabla se muestra el número y las características de los equipos de lavado para el acondicionamiento del cogollo de caña azúcar. La ficha técnica de este equipo se puede consultar en el Anexo 2. Tomado de: Jaidi, “Lavadora por inmersión.” [Online]. Available: <http://tomato-machinery.es/15-1-2-washing-machine.html>.

#### **4.2.2 Molienda**

Al tener la materia prima lavada y secada, este pasa por una molienda para la cual también se realizará una conceptualización de los tipos de molinos utilizados en la industria para la trituración de materiales y así seleccionar la molienda adecuada para el proceso.

- Molino de discos: en este equipo la molienda se da por medio de la presión y la frotación o la fuerza de cizallamiento que se ejerce entre dos discos, que son ajustado a la medida de la granulometría del producto que se desea. Estas unidades se utilizan frecuentemente para uso doméstico, como son los molinos para granos y carnes, además de que las superficies tienden a tener un mayor desgaste. [122] [123]
- Molino de rodillos: en este equipo se da por la compresión y fricción que se le ejerce al producto a moler, cuando pasa entre los dos rodillos que giran en sentidos opuestos, estos se ajustan a la granulometría del producto que se desea o espesor. Estas unidades requieren de materiales con

un contenido de aceite considerable, además de que el sistema de alimentación puede verse afectado fácilmente y necesita de un sistema de reducción de velocidad. [122] [123]

- Molino de bolas: en este equipo la molienda se da dentro de un cilindro de eje horizontal que contiene masas libres de acero, en forma de bolas. El material a moler entra en el cilindro, se hace rotar y las bolas en un movimiento de efecto cascada muelen el material por impacto y fricción. En su mayoría el tipo de molienda es húmeda, haciendo la descarga con agua, y cuando es seca, la descarga es por medio de corrientes de aire. A grandes velocidades las esferas no se separan de la pared debido a las fuerzas centrifugas. [122] [123]
- Molino de martillos: en este equipo la molienda se da dentro de una cámara que contiene un rotor de eje horizontal que está compuesto por extensiones móviles o fijas, llamados martillos, que son perpendiculares al eje y están a lo largo de él, el rotor gira con velocidad y potencia suficiente para moler el material que ingresa a la cámara, impactándolo con los martillos y a su vez con la superficie interna de la misma, el material molido sale al cumplir con la granulometría que define la criba, zaranda o rejilla de retención a la salida. Estas unidades pueden operar de manera continua, son fáciles de limpiar y operan en un sistema cerrado reduciendo el riesgo de contaminación cruzada, aunque con materiales fibrosos puede embotarse y no moler todo el volumen alimentado. [122] [123]

Según lo mencionado anteriormente la mejor alternativa para realizar la molienda del cogollo de caña de azúcar es el molino de martillos, que tiene una operación fácil y evita la contaminación con el ambiente, adicionalmente este equipo permite su aplicación a molienda intermedia-fina obteniendo un producto con un tamaño de partícula menor de 100  $\mu\text{m}$ , lo que permite mejorar el proceso de hidrólisis, ya que se presenta un material más asequible para el proceso. Tomando como referencia el equipo de trituradora de martillos del modelo PC400x600 del fabricante Znith© este equipo puede ser utilizado para la producción de polvo grueso y cuenta con las características mostradas en la Tabla 31. [124] [123] [125]

**Tabla 31.**

*Características del equipo de molienda*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo	PC400x600
Diámetro del rotor (mm)	600x400
Longitud del rotor (mm)	20
Cantidad de martillos	<150
Capacidad (ton/h)	18.5
Potencia (kW)	1000

*Nota.* En esta tabla se muestran las características del equipo de molienda para el pretratamiento del cogollo de caña de azúcar. La ficha técnica de este equipo se puede consultar en el Anexo 3. Tomado de: Znith, “Trituradora de Martillos.”

#### **4.2.3 Hidrólisis**

Luego de la molienda del cogollo de azúcar, este se debe someter a un proceso de hidrólisis térmica, enzimática o química, para realizar la descomposición de los carbohidratos complejos y obtenerlos en sus partes constitutivas para su posterior metabolización por el microorganismo.

Para establecer el tipo de hidrólisis a realizar, previamente se realizará la conceptualización de cada uno y así determinar el apropiado para el proceso:

- La hidrólisis térmica es un pretratamiento en el cual hay que aplicar altas presiones y temperaturas en un periodo de tiempo determinado, esto con el fin de romper las células (lisis), se desintegren, y que de esta manera los microorganismos puedan degradarlos. El rango de temperatura está entre 140-200°C y para presión entre 6-20 bar, alrededor de 30 minutos. [126]
- La hidrólisis enzimática tiene como objetivo hidrolizar la celulosa presente en el residuo lignocelulósico, por medio de la adicción de enzimas llamadas celulasas que cortan los enlaces beta-1,4-glucosídico de la celulosa y así, obtener monómeros de glucosa, es decir azúcares fermentables. [127]
- La hidrólisis química es una reacción con el agua en donde rompe los enlaces antiguos y forma nuevos enlaces, los tipos más comunes son: la hidrólisis salina ocurre al tener una sal de un

ácido o base débil y se disuelve en el líquido, formando iones hidróxido y cationes hidronio, la hidrólisis ácida en la cual el agua cede un protón y la hidrólisis básica consiste en agregar una base, agua y estar a altas temperaturas para descomponer la biomasa en aminoácidos y azúcares. [128]

De todas las alternativas para llevar a cabo la hidrólisis, la que tiene una mejor posición desde el punto de vista económico es la hidrólisis ácida, pero tiene un gran problema de corrosión y un uso intensivo de energía si la hidrólisis ácida se lleva a cabo con ácidos diluidos a 180°C. Sin embargo, el aumento en el conocimiento de las enzimas y su modo de acción, así como sus recientes aplicaciones han ampliado en gran medida las perspectivas de los procesos enzimáticos, el principal atributo del enfoque enzimático es su eficiencia de sacarificación potencialmente alta, observada en muchos estudios, razón por la cual en este trabajo se elige la hidrólisis enzimática como el proceso para el pretratamiento de la biomasa, usando lacasa industrial como enzima hidrolítica. [129] [130] [124]

Lacasa industrial, es una enzima comercial usada por su alta actividad hidrolítica en la deslignificación de la lignina (véase Anexo 4), ya que este polisacárido es resistente a la degradación de tipo biológica y química, por esta razón se incrementa el uso de degradación enzimática en los estudios de metabolización de biomasa, además de que esta enzima degrada la lignina sin generar reacciones o productos que puedan afectar la posterior fermentación. Esta enzima es producida por hongos y es estable en rangos de pH de 3 a 10 y a temperaturas entre los 5 y 55 °C. [124] [131]

Siendo así se la hidrólisis se llevará a cabo en un tanque agitado, por lo que es necesario conocer el volumen al cual va a operar este equipo, que es el volumen ocupado tanto por la biomasa como por la enzima, en la Tabla 32 se puede observar las densidades de cada uno de los componentes presentes en el cogollo de caña de azúcar.

**Tabla 32.***Densidades de los componentes del cogollo de caña de azúcar*

<b>Componente</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Celulosa	1,50	1500
Hemicelulosa	1,50	1500
Lignina	1,40	1400
N	1,25	1250
P	1,82	1820
K	0,86	860
Ca	1,55	1550
Mg	1,74	1740
S	2,07	2070
Agua	0,997	997

*Nota.* Esta tabla muestra las densidades de cada componente presente en el cogollo de caña de azúcar. Elaboración propia. Datos tomados de: LENNTECH B.V, “Elementos químicos ordenados por su densidad.” 2021, [Online]. Available: <https://www.lenntech.es/tabla-peiodica/densidad.htm>. | GOODFELLOW, “Celulosa (Regenerated Cellulose).” [Online] Disponible: <http://www.goodfellow.com/S/Celulosa.html>. | C. Gonzales, “Materiales compuestos termoplástico/lignina y su procedimiento de obtención.”.

Para determinar el volumen del residuo y por consiguiente la capacidad del tanque de hidrólisis, se tiene en cuenta la composición química del cogollo de caña de azúcar, que se muestra en la Tabla 7, en la que se puede observar que el 25% de la masa de este residuo corresponde a la materia en base seca y el 75% restante corresponde a la humedad. La materia en base seca contiene los componentes listados en la Tabla 33, que relacionados con los nombrados en la Tabla 7 corresponden a: la celulosa, hemicelulosa, lignina, fibra cruda, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, teniendo en cuenta que la fibra cruda corresponde a la mezcla entre la celulosa, hemicelulosa y lignina, con una composición del 90%, 5% y %, respectivamente. [132]

Principalmente, teniendo en cuenta que los componentes celulosa, hemicelulosa y lignina se encuentran implícitos en el porcentaje de la fibra cruda, se determina el porcentaje de cada uno de estos componentes en base seca, haciendo uso de la ecuación 1, donde *i* hace referencia al

componente,  $\%_{i,total}$  al porcentaje total en base seca,  $\%_{i,efc}$  al porcentaje en la fibra cruda,  $\%_{fc}$  de la fibra cruda y  $\%_{i,sfc}$  al porcentaje sin incluir el de la fibra cruda, a manera de ejemplo en la ecuación 2 se muestra el cálculo para la celulosa.

**Ecuación 1.**

$$\%_{i,total} = \frac{\%_{i,efc} * \%_{fc}}{100\%} + \%_{i,sfc}$$

**Ecuación 2.**

$$\%_{celulosa,total} = \frac{90\% * 28,3\%}{100\%} + 40,3\%$$

$$\%_{celulosa,total} = 65,77\%$$

Luego, se determina el porcentaje de todos los componentes en base húmeda haciendo uso de la ecuación 3, donde  $\%_{i,bh}$  hace referencia al porcentaje en base húmeda,  $\%_{i,bs}$  al porcentaje en base seca y  $\%_{bs}$  al porcentaje de la materia seca, a manera de ejemplo en la ecuación 4 se muestra el cálculo para la celulosa. Posteriormente, se determina la masa y volumen de cada uno de los componentes haciendo uso respectivamente de las ecuaciones 5 y 6, donde  $m_i$  hace referencia a la masa del componente,  $m_{total}$  a la masa total del sustrato, que corresponde a 144.000ton/año de cogollo de caña de azúcar a procesar,  $V_i$  al volumen del componente y  $\rho_i$  a la densidad del compuesto, los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla 33.

**Ecuación 3.**

$$\%_{i,bh} = \frac{\%_{i,bs} * \%_{bs}}{100\%}$$

**Ecuación 4.**

$$\%_{celulosa,bh} = \frac{65,77\% * 25\%}{100\%}$$

$$\%_{celulosa,total} = 16,44\%$$

**Ecuación 5.**

$$m_i = \%_{i,bh} * m_{total}$$

**Ecuación 6.**

$$V_i = \frac{m_i}{\rho_i}$$

**Tabla 33.***Masa y volumen de los componentes del cogollo de caña de azúcar*

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje en base seca (%)</b>	<b>Porcentaje en base húmeda (%)</b>	<b>Masa (ton/año)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>/año)</b>
Celulosa	65,77	16,44	23673,6	15782,4
Hemicelulosa	25,11	6,27	9028,8	6019,2
Lignina	5,62	1,40	2016	1440
N	0,7	0,17	244,8	195,84
P	0,2	0,05	72	35,56
K	2,1	0,52	748,8	870,69
Ca	0,3	0,07	100,8	65,03
Mg	0,2	0,05	72	41,38
S	0,2	0,05	72	34,78
<b>Total</b>		25,02	36028	24484,88

*Nota.* Esta tabla muestra las cantidades de masa y volumen de cada componente presente en el cogollo de caña de azúcar. Elaboración propia. Datos tomados de: E. Lagos and E. Castro, “Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes,” Agron. Mesoam., vol. 30, no. 3, pp. 917–933, 2019.

Con los datos y cálculos previos se obtiene como resultado un volumen de biomasa seca de 24484,88 m<sup>3</sup>/año para la cantidad de 36028 ton/año y un volumen de materia húmeda de 108296,89 m<sup>3</sup>/año para la cantidad de 107972 ton/año, para un volumen total de 132781,77 m<sup>3</sup>/año y para una planta de 360 días de operación el volumen de residuo total es de 368,84 m<sup>3</sup>/día, de igual manera, es necesario determinar el volumen ocupado por la enzima para el dimensionamiento y capacidad real del tanque agitado, por lo que, se realiza una dosificación de la enzima de 0,33 L por kg de materia seca, tomando como referencia un estudio realizado en cuanto a la hidrólisis enzimática de residuos de la caña de azúcar, lo que da como resultado, para la cantidad de residuo por día, un volumen de 33,03 m<sup>3</sup>. [124]

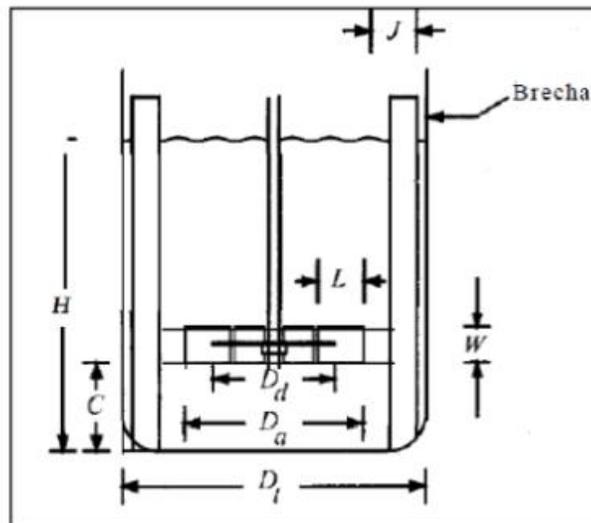
Por lo tanto, para el pretratamiento por hidrólisis del residuo se tiene un volumen total de 401,87 m<sup>3</sup>, y teniendo en cuenta que, para el dimensionamiento a nivel industrial de los tanques de agitación o biorreactores, generalmente, cuentan con capacidades de 0,3 a 30 m<sup>3</sup>, a continuación,

se detalla el procedimiento para hallar las dimensiones y cantidad de equipos en los que se va a llevar a cabo la hidrólisis. [136]

Principalmente, se deben considerar las dimensiones básicas para el dimensionamiento de un tanque agitado, mostradas en la Figura 2, donde  $D_t$  corresponde al diámetro del tanque,  $D_a$  al diámetro de la hélice,  $D_d$  al diámetro del agitador,  $H$  a la altura de trabajo,  $C$  a la altura del agitador respecto al tanque,  $W$  al ancho de la paleta,  $L$  a la longitud de la paleta y  $J$  al ancho de los baffles. Por otro lado, en la Tabla 34 se muestran las proporciones y relaciones básicas en las dimensiones del tanque agitado. [137]

**Figura 2.**

*Dimensiones básicas del tanque agitado*



**Nota.** El diagrama representa las respectivas dimensiones del tanque agitado. Tomado de: M. A. H. Neri, "Diseño de Tanque de Agitación," Fund. Univ. Las Américas Puebla, p. 6.

**Tabla 34.**

*Proporciones básicas de un tanque agitado*

<b>Proporciones básicas</b>			
$\frac{D_a}{D_t} = 0,5$	$\frac{H}{D_t} = 1$	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$
$\frac{D_a}{D_t} = \frac{2}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$	

*Nota.* Esta tabla muestra las propiedades básicas para el dimensionamiento del tanque y el agitador. Elaboración propia. Datos tomados de: M. A. H. Neri, “Diseño de Tanque de Agitación,” Fund. Univ. Las Américas Puebla, p. 6.

Teniendo como base la ecuación 7 para el cálculo del volumen de un cilindro (la forma de un tanque agitado) y tomando de la Tabla 34 una relación de 1:1 entre la altura de trabajo y el diámetro, se obtiene la ecuación 8 y se despeja el diámetro total, obteniendo la ecuación 9 y como resultado un diámetro y altura efectiva de 3,36 m.

**Ecuación 7.**

$$V = \frac{\pi D_t^2}{4} \cdot H$$

**Ecuación 8.**

$$V = \frac{\pi D_t^3}{4}$$

**Ecuación 9.**

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}}$$

$$D_t = 3,36m$$

$$H = 3,36m$$

Para garantizar que el fluido no rebose los límites del reactor por acción de la agitación ni por la formación espuma, se considera un factor de seguridad de aumento del 30% respecto a la altura, por lo tanto, se obtiene una altura total del tanque de 4,4 m. En la Tabla 35 se realiza la recopilación

de las dimensiones del tanque agitado y en la Tabla 36 se muestran las características del mismo [137]

$$H_T = 4,4 \text{ m}$$

**Tabla 35.**

*Dimensiones del tanque y el agitador*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$H_t$	4,4 m
H	3,36 m
$D_t$	3,36 m
$D_a$	1,68 m
$D_d$	1,12 m
C	1,12m
W	0,336m
L	0,42 m
J	0,28 m

**Nota.** Esta tabla muestra los respectivos valores del dimensionamiento del tanque agitado según las propiedades básicas. Elaboración propia.

**Tabla 36.***Características del equipo de tanque agitado*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Número de equipos	14
Capacidad (m <sup>3</sup> )	30
Material	Acero inoxidable 304
Tapa del tanque	Área de 8,86 m <sup>2</sup>
Agitador	Tipo Rushton, 150 rpm, 6 paletas
Potencia del agitador	8,26 kW
Sistema de control	pH, Temperatura y Presión

*Nota.* En esta tabla se muestra el número y las características del equipo de tanque agitado para la hidrólisis enzimática del cogollo de caña azúcar. Tomado de: K. Colunga and M. González, “Diseño De Un Tanque Agitado Para La Etapa De Hidrólisis En La Producción De Miel De Agave | Torres Colunga | Jóvenes En La Ciencia.” p. 5, [Online] Disponible:

<http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/752>. ] | L. Anhui Ruixu Mixing Equipment co, “China El rotor (Rushton turbina) para la mezcla de Industrial – Comprar El rotor en es.” [Online] Disponible: [https://es.made-in-china.com/co\\_js-ruixu/product\\_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing\\_ehunoeugg.html](https://es.made-in-china.com/co_js-ruixu/product_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing_ehunoeugg.html).

### 4.3 Biorreactor

Para el dimensionamiento del biorreactor tomando en cuenta la revisión bibliográfica sobre la producción de hidrógeno por medio de *Enterobacter Cloacae*, en donde se estudió la influencia del tiempo de fermentación sobre la concentración de células y el rendimiento de producción hidrógeno, por lo que se establece que el tiempo óptimo de fermentación es de 23 a 24h. [140]

Teniendo en cuenta que el biorreactor se va a diseñar con el mismo concepto del diseño de un tanque agitado, el dimensionamiento de este corresponde al presentado en la Tabla 35, sin embargo, se debe considerar el respectivo valor del volumen del residuo mezclado con la enzima (401,87 m<sup>3</sup>) y del microorganismo, para este último se tiene en cuenta un estudio realizado por “International Journal of Hydrogen Energy”, en donde realizaron la inoculación con *E. cloacae* a una proporción del 1% v/v y siguiendo con la metodología, el volumen del microorganismo se

calcula haciendo uso de la ecuación 10 que muestra la forma de calcular el porcentaje en volumen de determinado componente, porcentaje que puede expresarse también como se muestra en la ecuación 11, respecto al sistema presente (sustrato + enzima + microorganismo). Posteriormente, se reemplaza el valor del porcentaje en volumen y se despeja el volumen del microorganismo, obteniendo las ecuaciones 12, 13 y 14. [140]

**Ecuación 10.**

$$\% \frac{v}{v} = \frac{\text{volumen soluto}}{\text{volumen solución}}$$

**Ecuación 11.**

$$\% \frac{v}{v} = \frac{\text{volumen microorganismo } (V_m)}{\text{volumen sustrato, enzima } (V_{s,e}) + \text{volumen microorganismo } (V_m)}$$

**Ecuación 12.**

$$0,01 = \frac{V_m}{V_{s,e} + V_m}$$

**Ecuación 13.**

$$0,01(V_{s,e} + V_m) = V_m$$

**Ecuación 14.**

$$V_m = \frac{0,01V_{s,e}}{0,99}$$

Entonces, teniendo en cuenta la anterior relación (mostrada en la ecuación 8) el volumen ocupado por el microorganismo es de 4,06 m<sup>3</sup>, por lo tanto, el volumen total sería de 405,93 m<sup>3</sup>. En la Tabla 37 se muestran las respectivas características del biorreactor, considerando las dimensiones determinadas anteriormente.

**Tabla 37.***Características del biorreactor*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Número de equipos	14
Capacidad (m <sup>3</sup> )	30
Material	Acero inoxidable 304
Tapa del tanque	Área de 8,86 m <sup>2</sup>
Agitador	Tipo Rushton, 150 rpm, 6 paletas
Potencia del agitador	8,26 kW
Sistema de control	pH, Temperatura y Presión

*Nota.* En esta tabla se muestra el número y las características del equipo biorreactor para la fermentación del cogollo de caña azúcar con *Enterobacter Cloacae*. Tomado de: K. Colunga and M. González, “Diseño De Un Tanque Agitado Para La Etapa De Hidrólisis En La Producción De Miel De Agave | Torres Colunga | Jóvenes En La Ciencia.” p. 5, [Online] Disponible: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/752>. | L. Anhui Ruixu Mixing Equipment co, “China El rotor (Rushton turbina) para la mezcla de Industrial – Comprar El rotor en es.” [Online] Disponible: [https://es.made-in-china.com/co\\_js-ruixu/product\\_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing\\_ehunoeugg.html](https://es.made-in-china.com/co_js-ruixu/product_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing_ehunoeugg.html).

Adicionalmente, para crear condiciones cercanas a las anaerobias al momento de poner en marcha la fermentación se debe realizar una purga por 20 min con nitrógeno del 99.9% de pureza a un flujo aproximado de 14L/min. [141]

#### **4.4 Separación, purificación**

Para la separación y purificación del hidrógeno se debe tener en cuenta que a medida que ocurre la fermentación, el hidrógeno formado debe ser retirado continuamente, debido a que el aumento de la presión parcial de este componente afecta la producción del mismo, esta es la razón por la cual el biorreactor va a estar integrado con la separación in-situ del hidrógeno, aprovechando que el espacio superior del biorreactor, está ocupado mayoritariamente por los gases hidrógeno (H<sub>2</sub>) y

dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que son los principales productos gaseosos generados en la fermentación. [140]

Según la aplicación del hidrógeno existen varios métodos de separación y purificación, dentro de los más usados a nivel industrial se encuentra: destilación criogénica, adsorción por cambios de presión y el uso de membranas, el respectivo costo de operación y energético determina cual proceso es más viable. [142]

Para establecer el tipo de proceso a utilizar, previamente se realizará la conceptualización de cada uno y así determinar el apropiado para el proceso:

- Destilación criogénica: Este método se basa en los puntos de ebullición de cada componente presente en la mezcla, se usa en la industria petroquímica para separar hidrógeno del metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono, sin embargo, esta operación presenta un costo energético elevado por las condiciones de operación que deben mantenerse. [142]
- Adsorción por cambios de presión: Este método es el más usado a nivel industrial en donde utiliza un adsorbente que permite retener impurezas logrando obtener altas purezas, cercanas al 99%. Así mismo este proceso posee un elevado consumo energético lo cual es una desventaja en costos para el proceso. Generalmente por sus altas tasas de producción se usa en la industria petroquímica. [142]
- Por membranas: Este método usa barreras selectivas que permiten la separación del componente deseado. Esta operación reduce el uso de equipos lo cual refleja una ventaja económica al proceso. El uso de membranas para la separación de gases presenta una opción realista, viable y es más comercial, teniendo en cuenta que una de sus ventajas es que no necesita de químicos adicionales en el proceso, posee requisitos de operación moderados. [142] [143]

Por su ventaja energética y económica, centraremos el uso de membranas para la separación del hidrógeno y purificación de este al separarlo del  $\text{CO}_2$  y darle su respectivo uso.

Entre las membranas para la separación de hidrógeno se encuentran dos tipos: orgánicos que son aquellas que se obtienen polímeros orgánicos o los inorgánicos que se obtienen de materiales de metal, cerámicos, carbón o vidrio. Las membranas poliméricas no porosas se han registrado como las más usadas en la separación de biohidrógeno, ya que presenta mejor permeabilidad y selectiva

en el sistema de gases que presenta, además el producto alcanza una pureza del 99% y la pérdida de hidrógeno es del 2%. [143]

En este caso se trabajará con la membrana de poliimida, la cual está diseñada para la purificación de hidrógeno con una selectividad de  $H_2/CO_2$  de 1,62, y trabaja con una temperatura de operación óptima de  $55^\circ$  y una presión de alimentación de 2,2 bares. Sin embargo, se debe tener en cuenta que es típico de los procesos de separación por membrana no tener una selectividad suficiente para lograr la remoción completa del dióxido de carbono en una sola etapa de separación, por lo que se propone de tres etapas de separación para la purificación del hidrógeno. [144]

#### **4.5 Almacenamiento**

El almacenamiento de hidrógeno es un factor importante en cuanto a su uso y disposición final, ya sea para energía estacionaria, energía portátil o para el transporte. El almacenamiento del hidrógeno en estado gaseoso requiere de tanques a altas presiones (entre el rango de 350 a 700 bar), mientras que para el almacenamiento de hidrógeno en estado líquido se necesita de temperaturas criogénicas, ya que el punto de ebullición del hidrógeno es de  $-252.8^\circ C$ , y se utiliza normalmente para el transporte de hidrógeno a granel, con poca actividad en su desarrollo para uso automotriz. [145] [146]

En esta ocasión se va a proponer el almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso, ya que este tipo de almacenamiento permite el uso directo del mismo y se han establecido cientos de prototipos de automóviles con pilas de combustible de hidrógeno, que se basan en una capacidad de 5 a 13 kg de hidrógeno que permita cumplir con un rango de conducción de más de 300 millas, al mismo tiempo que proporcione las características de autonomía, espacio, peso y seguridad. [145] [146] [147]

Siendo así, para el dimensionamiento de almacenamiento de hidrógeno se estableció una capacidad de 5 kg de hidrógeno, teniendo en cuenta una densidad volumétrica  $0,030 \text{ kg } H_2$  por litro del sistema, por lo que se establece el volumen del almacenamiento haciendo uso de la ecuación 15, donde  $V$  hace referencia al volumen del tanque,  $m$  a la masa de hidrógeno y  $\rho$  a la densidad volumétrica del sistema, obteniéndose como resultado un volumen de  $0,166 \text{ m}^3$ . [146]

**Ecuación 15.**

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = 166,66 L$$

$$V = 0,166 m^3$$

De igual manera, se determinan las dimensiones del tanque de almacenamiento estableciendo una relación entre la altura y el diámetro de 3:1, y reemplazando en la ecuación 7 se obtienen las ecuaciones 16 y 17, y al despejar se obtiene la ecuación 18.

**Ecuación 16.**

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 3D$$

**Ecuación 17.**

$$V = \frac{3\pi D^3}{4}$$

**Ecuación 18.**

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{3\pi}}$$

$$D = 0,41m$$

$$H = 1,24m$$

Por último, el material del tanque para almacenar el hidrógeno se establece según el proyecto europeo EIHPE (European Integrated Hydrogen Project), siendo el de Tipo I, que es un depósito totalmente metálico (acero o aluminio). En la Tabla 38 se muestran las respectivas características de los tanques de almacenamiento. [148]

**Tabla 38.***Características del equipo de almacenamiento*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Número de contenedores	3112
Capacidad de los contenedores (m <sup>3</sup> )	0,166
Capacidad del gas (kg)	5
Material	Acero estirado al Cr-Mo
Área (m <sup>2</sup> )	0,13

*Nota.* En esta tabla se muestra el número y las características del equipo de almacenamiento. Datos tomados de: H. and F. C. T. Office, “Hydrogen Storage \_ Department of Energy.” [Online] Disponible: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. | E. López, “Definición de criterios de diseño de instalaciones de almacenamiento de hidrógeno producido con energías renovables,” T.Doctotral, p. 265, 2013.

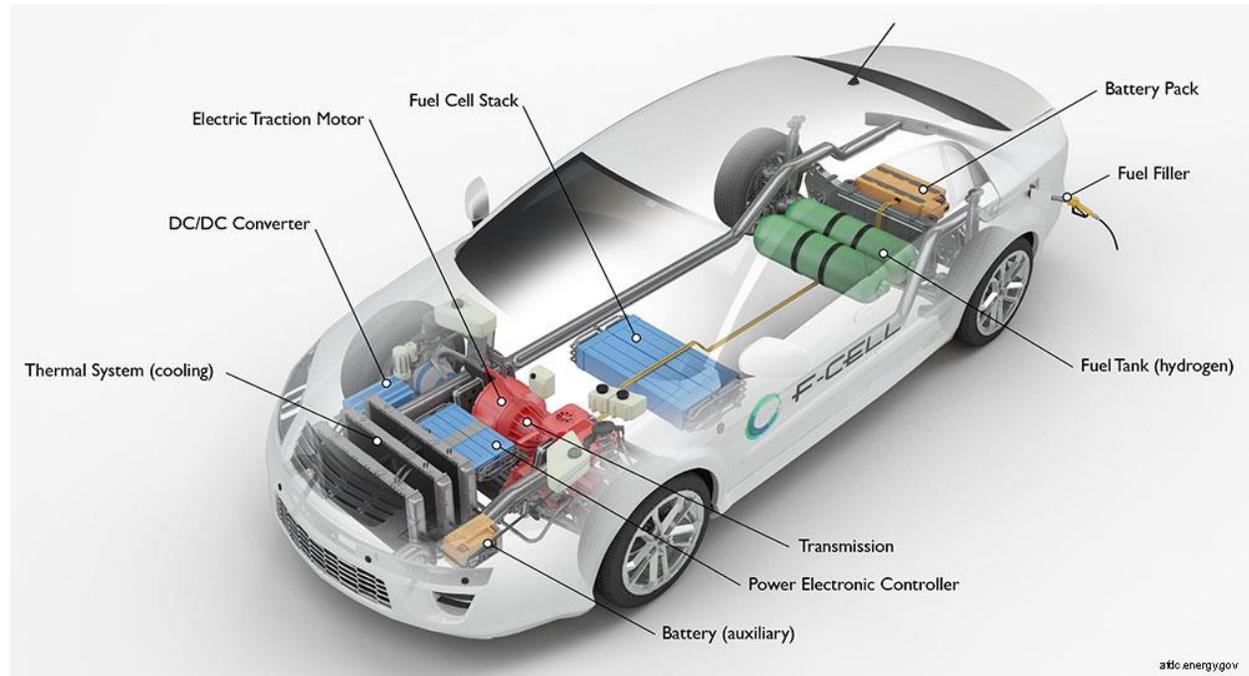
Adicionalmente, se realiza una conceptualización del funcionamiento de los vehículos eléctricos de pila combustible (FCEV, por sus siglas en inglés) alimentada por hidrógeno. Principalmente, durante el proceso de diseño del automóvil, el fabricante define la potencia del mismo por el tamaño del motor eléctrico que recibe energía eléctrica de la combinación de la pila de combustible y la batería del tamaño adecuado. Aunque los fabricantes de automóviles podrían diseñar un FCEV con capacidades enchufables para cargar la batería, la mayoría de los FCEV actuales utilizan la batería para recuperar la energía de frenado, proporcionar energía adicional durante eventos de aceleración cortos o apagar la pila de combustible durante las necesidades de baja potencia, razón por la cual la cantidad de energía almacenada a bordo está determinada por el tamaño del tanque de combustible de hidrógeno, lo cual es diferente al funcionamiento un vehículo completamente eléctrico, donde la cantidad de energía y la energía disponible están estrechamente relacionadas con el tamaño de la batería. [149]

En la Figura 3 se muestran los componentes básicos de un automóvil eléctrico de pila de combustible de hidrógeno, el cual puede alimentarse en menos de 4 minutos y tiene un rango de conducción de más de 300 millas, además tiene una eficiencia mayor que los automóviles convencionales con motor de combustión interna y no produce emisiones de escape, solo emiten

vapor de agua y aire caliente, ya que en una pila de combustible PEM (membrana electrolítica de polímero), el tipo más común de pila de combustible para aplicaciones de vehículos, que cuenta con una membrana electrolítica intercalada entre un cátodo y un ánodo, permite la introducción del hidrógeno en el ánodo y el oxígeno (del aire) se introduce en el cátodo. Las moléculas de hidrógeno se rompen en protones y electrones debido a una reacción electroquímica en el catalizador de la pila de combustible, luego, los protones viajan a través de la membrana hasta el cátodo, mientras que los electrones se ven obligados a viajar a través de un circuito externo para realizar el trabajo proporcionando energía al automóvil eléctrico y luego se recombinan con los protones en el lado del cátodo, donde los protones, electrones y moléculas de oxígeno se combinan para formar agua. [150]

### Figura 3.

#### Componentes clave de un carro eléctrico de pila de combustible de hidrógeno



**Nota.** La figura muestra los componentes clave de un carro eléctrico de pila de combustible de hidrógeno: battery (auxiliar)/batería (auxiliar), battery pack/batería, DC/DC converter/convertidor CC/CC, electric traction motor/motor de tracción eléctrica, fuel cell stack/pila de combustible, fuel filler/llenador de combustible, fuel tank (hydrogen)/depósito de combustible (hidrógeno), power electronics controller/controlador de electrónica de potencia, thermal system (cooling)/sistema térmico (refrigeración), transmisión (electric)/transmisión (eléctrica). Tomado de: Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, “How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?” Key Components of a Hydrogen Fuel Cell Electric Car, 2017. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>.

### 4.6 Balance de materia y energía

Finalmente, se muestra el balance de materia y energía aproximado del proceso propuesto para la producción de hidrógeno.

#### 4.6.1 Balance de materia

Para la realización del balance de materia estimado para el proceso propuesto, que se muestra en la Tabla 39, se utilizaron diferentes relaciones, listadas a continuación, de estudios de producción de hidrógeno por fermentación oscura con el microorganismo *Enterobacter cloacae* o de la hidrólisis enzimática.

- Dosificación de la enzima lacasa industrial de 0,33L por kg de materia seca. [124]
- Los rendimientos de hidrólisis enzimática con pretratamientos pueden alcanzar más del 90%. [151]
- Se producen 3,3 moles de hidrógeno por mol de glucosa. [9]
- Se producen 2 moles de dióxido de carbono por mol de glucosa. [140]

**Tabla 39.***Balance de materia*

<b>Corriente</b>	<b>Biomasa (cogollo de caña de azúcar)</b>	<b>Agua de lavado</b>	<b>Enzima hidrolítica</b>	<b>Biomasa hidrolizada</b>	<b>Microorganismo</b>	<b>Mezcla gaseosa a separar</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Dióxido de carbono</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	27	27	27	27	37	37	27	27
<b>Presión (bar)</b>	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	2,2	2,2	0,902
<b>Flujo total (ton/día)</b>	400,00	400,00	33.03*	400,00	4.06*	184,84	15,56	169,28
<b>Flujo por componente (ton/día)</b>								
Agua	299,92	400,00	0,00	29,99	0,00	0,00	0,00	0,00
Celulosa	65,76	0,00	0,00	6,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Hemicelulosa	25,08	0,00	0,00	2,51	0,00	0,00	0,00	0,00
Lignina	5,60	0,00	0,00	5,60	0,00	0,00	0,00	0,00
N <sub>2</sub>	0,68	0,00	0,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00
P	0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
K	2,08	0,00	0,00	2,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,28	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Glucosa	0,00	0,00	0,00	351,69	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,01	12,75	0,26
CO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	171,83	2,81	169,02
Enzima lacasa	0,00	0,00	33.03*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>E. cloacae</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	4.06*	0,00	0,00	0,00

**Nota.** En esta tabla se muestra el balance de energía estimado para el proceso de producción de hidrógeno propuesto.

\* Unidades en m<sup>3</sup>. Elaboración propia.

#### 4.6.2 Balance de energía

Para la realización del balance de energía estimado para el proceso propuesto, se tomaron las potencias requeridas para el funcionamiento de los equipos de lavado, molienda, agitación del tanque de hidrólisis y agitación del biorreactor, mostradas en la Tabla 40.

**Tabla 40.**

*Potencias requeridas por los equipos*

<b>Equipo</b>	<b>Potencia (kW)</b>
Lavado	3,8
Molienda	1000
Agitación tanque de hidrólisis	8,26
Agitación biorreactor	8,26

*Nota.* En esta tabla se muestran las potencias requeridas para los equipos de lavado, molienda, agitación del tanque de hidrólisis y del biorreactor. Tomado de: L. Atarama Valdiviezo, “Sistematización De Diseño De Molinos De Martillos Fijos Para Grano,” Univ. Piura, p. 230, 2018. | Znith, “Trituradora de Martillos.” | L. Anhui Ruixu Mixing Equipment co, “China El rotor (Rushton turbina) para la mezcla de Industrial – Comprar El rotor en es.” [Online] Disponible: [https://es.made-in-china.com/co\\_js-ruixu/product\\_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing\\_ehunoeugg.html](https://es.made-in-china.com/co_js-ruixu/product_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing_ehunoeugg.html).

Adicionalmente, se calcula la cantidad necesaria de calor que debe transferirse al sistema para mantener el biorreactor con una temperatura de 37°C, la cantidad de potencia necesaria para comprimir la mezcla gaseosa hasta 2,2 bar para la operación de la membrana y hasta 350 bar para el almacenamiento en los tanques, para esto es necesario contar con las capacidades caloríficas de cada uno de los componentes, que se muestran en la Tabla 41.

Para determinar la cantidad de calor necesaria para mantener el biorreactor a una temperatura de 37 °C, se usa la ecuación 22, donde Q hace referencia al calor transferido al sistema,  $\dot{m}$  la cantidad de masa a la que se debe transferir el calor,  $C_{p,M}$  a la capacidad calorífica de la mezcla,  $T_1$  a la temperatura inicial del sistema y  $T_2$  a la temperatura de final del sistema. El valor de  $\dot{m}$  se tomará la cantidad de biomasa que se ingresa al biorreactor como el flujo másico y para el caso del  $C_p$  de

la mezcla se hará uso de la ecuación 23, donde  $x_i$  hace referencia a la fracción másica de un componente y  $C_{p,i}$  a la capacidad calorífica del componente. Se obtiene como resultado una transferencia de calor de 67,87 kW.

**Tabla 41.***Capacidades caloríficas de los componentes*

Componente	Coeficientes cálculo Cp						
	A	B	C	D	E	F	G
Agua <sup>a</sup>	-22,42	0,88	-2,57E-03	2,48E-06	-	-	-
Celulosa <sup>b</sup>	6,00	-657,80	-	-	-	-	-
Hemicelulosa <sup>b</sup>	7,40	-965,90	-	-	-	-	-
Lignina <sup>c</sup>	1,10	-	-	-	-	-	-
N <sub>2</sub> <sup>a</sup>	28,72	0,01	-4,55E-05	1,16E-07	-1,22E-10	5,90E-14	-1,09E-17
P <sup>a</sup>	17,32	-0,31	3,29E-03	-1,33E-05	2,65E-08	-2,61E-11	1,01E-14
K <sup>a</sup>	-19,88	1,27	-1,44E-02	8,24E-05	-2,46E-07	3,60E-10	-1,93E-13
Ca <sup>a</sup>	14,16	0,08	-2,82E-04	6,49E-07	-8,79E-10	6,10E-13	-1,64E-16
Mg <sup>a</sup>	2,54	0,18	-6,06E-04	1,12E-06	-1,15E-09	6,29E-13	-1,43E-16
S <sup>a</sup>	24,45	-0,53	7,68E-03	-4,98E-05	1,73E-07	-3,09E-10	2,24E-13
Glucosa <sup>a</sup>	6,00	0,72	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
H <sub>2</sub> <sup>a</sup>	19,67	0,07	-2,00E-04	2,89E-07	-2,22E-10	8,81E-14	-1,42E-17
CO <sub>2</sub> <sup>a</sup>	23,51	0,04	7,40E-05	-2,23E-07	2,34E-10	-1,15E-13	2,17E-17

**Nota.** En esta tabla se muestran las capacidades caloríficas de los componentes. a Capacidad calorífica calculada con la ecuación 19 en J/mol·K, b capacidad calorífica calculada con la ecuación 20 en kJ/mol·K, c capacidad calorífica calculada con la ecuación 21 en kJ/kg·K. Datos tomados de: C. Qi, S. Hou, J. Lu, W. Xue, and K. Sun, "Thermal characteristics of birch and its cellulose and hemicelluloses isolated by alkaline solution," *Holzforschung*, vol. 74, no. 12, pp. 1099–1112, 2020, doi: 10.1515/hf-2019-0285. | Z. Michael, Z. Ruan, M. Bustamante, Y. Liu, and W. Liao, "A sustainable lignocellulosic biodiesel production integrating solar and biopower generation," *Gene Regul. Metab.*, pp. 1–17, 2018, doi: 10.7551/mitpress/3215.003.0017. | Yaws, Carl L. (2009). *Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals*. Knovel. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpYHTPHC09/yaws-handbook-thermodynamic/yaws-handbook-thermodynamic>

**Ecuación 19.**

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5 + GT^6$$

**Ecuación 20.**

$$Cp = AT + B$$

**Ecuación 21.**

$$C_p = A$$

**Ecuación 22,**

$$Q = \dot{m} \cdot C_{p,M} \cdot (T_1 - T_2)$$

**Ecuación 23.**

$$C_{p,M} = \sum x_i \cdot C_{p,i}$$

$$Q = 67,87 \text{ kW}$$

Para determinar la cantidad de potencia necesaria para los procesos de compresión de la mezcla gaseosa y del hidrógeno, se hace uso de la ecuación de la primera ley de la termodinámica, ecuación 24, donde  $dQ/dt$  hace referencia a la transferencia de calor del sistema,  $\dot{W}_{eje}$  a la potencia del eje del compresor,  $\dot{m}$  al flujo másico,  $v$  a la velocidad de la sustancia,  $g$  a la aceleración de la gravedad,  $z$  a la altura,  $h$  a la entalpia de la sustancia y los subíndices 1 y 2 a la entrada y salida de sustancia, respectivamente. En este caso el flujo másico es constante, se va a tomar la compresión de las sustancias como un proceso adiabático y la variación de las energía potencial y cinéticas como 0, por lo que se obtiene la ecuación 25 y teniendo en cuenta la ecuación 26, que muestra la relación entre la entalpia y la capacidad calorífica de una sustancia, se obtiene la ecuación 27. Finalmente, se obtiene una potencia de 69,73 kW para la compresión hasta 2,2 bar de la mezcla gaseosa que se va a separar por medio de la membrana de poliimida y una potencia de 205,14 kW para el almacenamiento hasta 30 bar.

**Ecuación 24.**

$$\frac{dQ}{dt} - \dot{W}_{eje} = -\dot{m}_1 \left( \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 + h_1 \right) + \dot{m}_2 \left( \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 + h_2 \right)$$

**Ecuación 25.**

$$\dot{W}_{eje} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

**Ecuación 26.**

$$(h_1 - h_2) = C_p(T_1 - T_2)$$

**Ecuación 27.**

$$\dot{W}_{eje} = \dot{m}C_p(T_1 - T_2)$$

$$Q_{2,2bar} = 69,73 \text{ kW}$$

$$Q_{350bar} = 205,14 \text{ kW}$$

Los datos del balance de energía estimado para el funcionamiento del biorreactor y los compresores se muestran en la Tabla 42. Adicionalmente, en la Figura 4 se muestra el diagrama de bloques para el proceso de producción de hidrógeno propuesto.

**Tabla 42.**

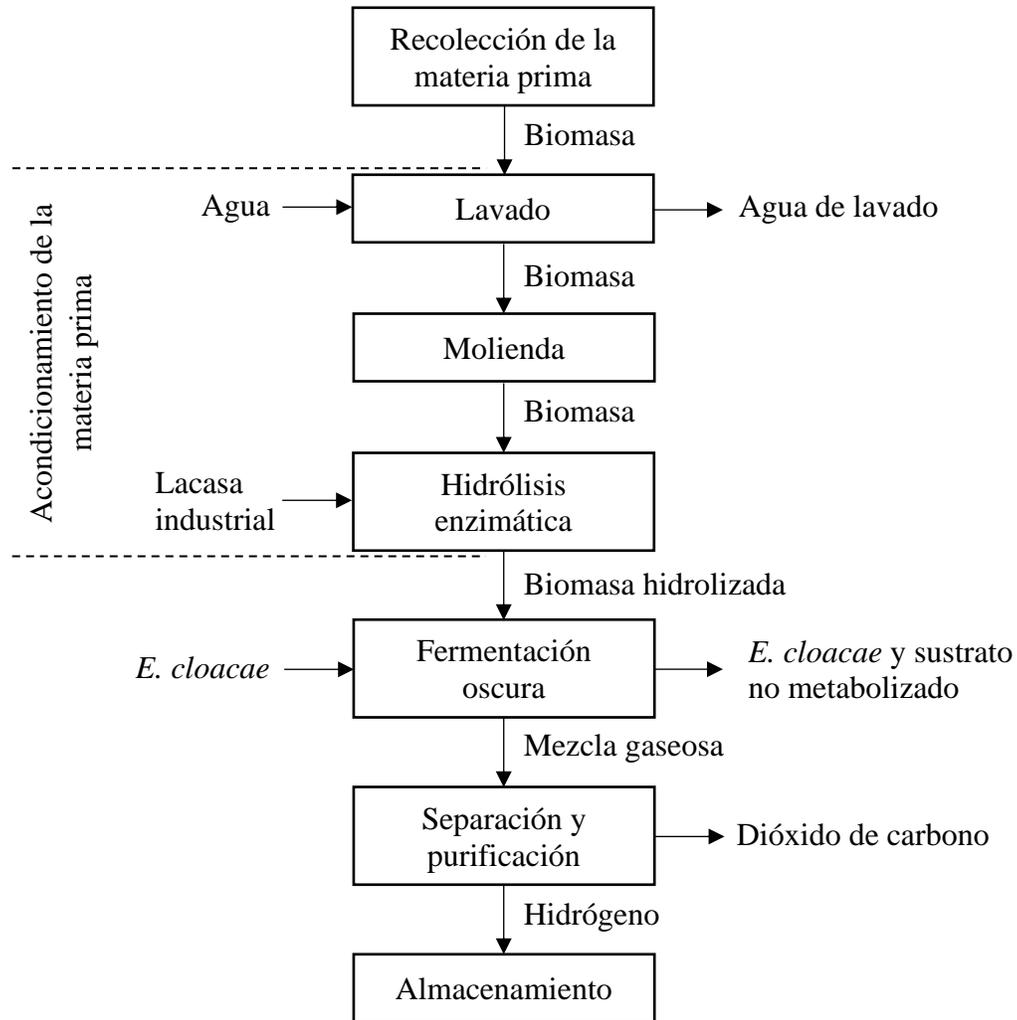
*Transferencia de calor y potencias de los compresores*

<b>Equipo</b>	<b>Potencia o calor (kW)</b>
Biorreactor	67,87
Compresor 1 (2,2 bar)	69,72
Compresor 2 (350 bar)	205,14

*Nota.* En esta tabla se muestran los valores de la transferencia de calor necesaria para el biorreactor y las potencias necesarias para la compresión de los fluidos. Elaboración propia.

**Figura 4.**

*Diagrama BFD de la obtención de hidrógeno a partir de cogollo de caña de azúcar*



*Nota.* El diagrama representa el proceso BFD de la obtención de hidrógeno a partir del cogollo de caña de azúcar. Elaboración propia

## 5. ANÁLISIS

La producción de hidrógeno como una energía limpia, a partir de residuos o desecho reduce el impacto que estos puedan generar, además es una alternativa prometedora para ayudar con la demanda energética que ha ido aumentando con el paso de los años. El proceso de hidrógeno propuesto por fermentación oscura es un método viable para la producción de hidrógeno, ya que gracias a la revisión bibliográfica realizada se observó que existe la posibilidad de trabajar con varias familias y géneros de bacterias productoras de hidrógeno, entre las cuales predominan las bacterias de los géneros *Enterobacter*, *Clostridium* y *Thermotoga*, para las cuales los requerimientos nutricionales de crecimiento y para la producción de hidrógeno pueden garantizarse con el uso de residuos de la industria, además, con esta bacterias es posible tener un mejor control de las respectivas condiciones de operación de tal manera que se pueda obtener una buena producción de hidrógeno.

Según lo anterior, se tuvieron en cuenta los diferentes factores que afectaban la producción de hidrógeno por fermentación oscura, para los cuales se estableció inicialmente el pH adecuado tanto para la operación de la enzima como el del microorganismo de tal manera que la operación de la enzima no afectara el crecimiento del microorganismo y observando se tiene un rango de pH óptimo compatible entre ambos procesos (hidrólisis por la enzima lacasa y fermentación oscura por *E. cloacae*), se estableció un valor de 6,5 para este parámetro y así evitar que se presente la inhibición de la reacciones biológicas, no obstante, de manera experimental se debe realizar el ajuste y control adecuado del pH para que no se vea afectada la tasa de producción de hidrógeno.

Seguido a esto, al determinar la *E. cloacae* como el microorganismo adecuado para la producción de hidrógeno, se establecieron las condiciones bajo las cuales debe operar el proceso de fermentación oscuras, que son, como ya se mencionó anteriormente pH de 6,5 y temperatura mesófila, específicamente de 37°C, de igual manera esta temperatura genera beneficios en cuanto a la energía que consume y el control del proceso necesario, en comparación con los procesos realizados que trabajan con bacterias termófilas.

En cuanto a los factores que afectan la producción de hidrógeno por fermentación oscura, se tuvo en cuenta la presión parcial del hidrógeno en la etapa del biorreactor, en el que se estableció una extracción y separación continua del hidrógeno, que está en presencia del dióxido de carbono, un subproducto gaseoso de la fermentación oscura, de tal manera que al producirse continuamente el

hidrógeno no se presenten cambios ni aumentos significativos de la presión parcial del mismo, con el fin de que no se vea afectado el metabolismo del microorganismo.

Por último, la implementación de membranas para la separación y purificación del hidrógeno del dióxido de carbono para obtener el primero como producto final de alta pureza, se considera como una buena tecnología ya que tiene condiciones de operación asequibles y los requerimientos necesarios no son altamente exigentes, ya que estas son barreras selectivas que permiten permear el producto de interés con eficiencia. Para el almacenamiento del hidrógeno es necesario usar contenedores a alta presión de tal forma que la pila de combustible permita utilizar el hidrógeno para generar la energía necesaria para el movimiento de los automóviles.

De igual manera, se hace énfasis en la necesidad de obtener hidrógeno con una alta pureza de forma que se puedan llevar a cabo las reacciones en los electrodos con la mayor eficiencia posible, ya que los catalizadores sobre los que se da la formación de vapor son sensibles a las impurezas del combustible, lo que puede disminuir la eficiencia y suministrar una menor energía al automóvil lo que puede ocasionar una reducción en la potencia del mismo. Igualmente, se requiere de una alta pureza del hidrógeno al tener en cuenta que la cantidad de energía disponible a bordo del automóvil depende del tamaño del tanque de combustible de hidrógeno, lo que quiere decir que si se tiene hidrógeno de baja pureza el tamaño del tanque de almacenamiento no va a representar totalmente la cantidad hidrógeno disponible para la generación de energía.

## 6. CONCLUSIONES

Se determinó el residuo agroindustrial a ser aprovechado como sustrato para la producción de biohidrógeno, estableciendo como criterios de selección el tipos de carbohidratos presentes en el residuo, la relación C/N del residuo y la cantidad de residuo desechada por la agroindustria, todos estos criterios se consignaron en la matriz PUGH, que permitió comparar las características de las diferentes alternativas y con la ponderación de cada uno de los criterios, se obtuvo como resultado que el cogollo de azúcar es el residuo óptimo para la producción de hidrógeno.

Al igual que con el residuo agroindustrial, para seleccionar el microorganismo se utilizó la matriz PUGH, que, después de comparar las diferentes alternativas, permitió determinar que la bacteria *Enterobacter cloacae* es una opción adecuada para la producción de hidrógeno, estableciendo como criterios de decisión la temperatura óptima de crecimiento, el tipo de respiración celular, el tipo de fermentación y el rendimiento reportado de producción de hidrógeno. Adicionalmente, se detallaron las condiciones de operación bajo las cuales debe operar el biorreactor para garantizar el crecimiento del microorganismo con altos valores de producción de hidrógeno.

Finalmente, se realizó el diseño conceptual para la propuesta de producción de hidrógeno por fermentación oscura, para el cual se detallaron las características del sustrato y del microorganismo y la ubicación donde se llevaría a cabo el proceso, este último parámetro es de relevancia ya que se tuvieron en cuenta los tres principales departamentos de la agroindustria correspondiente al residuo seleccionado (industria del azúcar) y estableciendo algunos criterios de selección a los cuales se les asignó una valoración, se seleccionó uno de los tres departamentos, lo que permitió determinar la capacidad de procesamiento del proceso, tomando un porcentaje de la cantidad de residuo desechada por el departamento seleccionado. Después, se realizó la selección de los pretratamientos a los que se iba a someter el sustrato y se tomaron las capacidades de estos procesos, permitiendo determinar las dimensiones y cantidad de equipos necesarios para el procesamiento del sustrato. De igual forma, con la capacidad de los tanques agitados, se pudo determinar el número de biorreactores necesarios para el procesamiento de las 400ton/día del residuo.

Para el caso de la purificación de hidrógeno, la respectiva revisión de la bibliografía mostro que la tecnología de uso de membranas para usos industriales necesita de más investigación específica para detallar una relación entre el dimensionamiento de las membranas y la cantidad de hidrógeno

que se necesita obtener como producto de alta pureza de determinado proceso. Se presento una situación similar con el almacenamiento de hidrógeno, ya que las formas de almacenamiento que se utilizan actualmente están enfocadas en la utilización de hidrógeno como materia prima industrial o como hidrógeno de uso no directo, no para el uso de hidrógeno directo como combustible para automóviles.

## REFERENCIAS

- [1] Iberdrola, “Qué es el Hidrógeno Verde y su importancia ,” Iberdrola. 2021, [Online] Disponible: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>.
- [2] Guerra C.; Rodríguez E., “El hidrógeno: vector energético del futuro,” *Energía Minas Rev.*, pp. 20–27, 2010, [Online] Disponible: <https://documat.unirioja.es/descarga/articulo/3395283.pdf>
- [3] M. H. McCay and S. Shafiee, “Hydrogen: An energy carrier,” *Futur. Energy Improv. Sustain. Clean Options Our Planet*, pp. 475–493, 2020, doi: 10.1016/B978-0-08-102886-5.00022-0.
- [4] R. Ramachandran and R. K. Menon, “An overview of industrial uses of hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 7, pp. 593–598, 1998, doi: 10.1016/s0360-3199(97)00112-2.
- [5] C. Industrial, E. Electr, and N. Industrial, “Proyecto Fin De Carrera Hidrógeno: Vector Energético En.”
- [6] Guerra C.; Rodríguez E., “El hidrógeno: vector energético del futuro,” *Energía Minas Rev.*, pp. 20–27, 2010, [Online] Disponible: <https://documat.unirioja.es/descarga/articulo/3395283.pdf>.
- [7] B. Sundén, “Chapter 3 Hydrogen,” *Hydrog. Batter. Fuel Cells.*, pp. 37–55, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-816950-6.00003-8.
- [8] K. Y. Show, Y. G. Yan, and D. J. Lee, “Biohydrogen production: Status and perspectives,” *Biomass, Biofuels, Biochem. Biofuels Altern. Feed. Convers. Process. Prod. Liq. Gaseous Biofuels*, pp. 693–713, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-816856-1.00028-2.
- [9] B. Gopalakrishnan, N. Khanna, and D. Das, *Dark-Fermentative Biohydrogen Production*. 2019.
- [10] K. Cury R, Y. Aguas M, A. Martínez M, R. Olivero V, and L. Chams Ch, “Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento,” *Rev. Colomb. Cienc. Anim. - RECIA*, vol. 9, no. S, p. 122, 2017, doi: 10.24188/recia.v9.ns.2017.530.
- [11] “Residuos agropecuarios,” Generalitat valenciana conselleria de infraestructuras, territorio y medio ambiente.
- [12] E. Palma Cardos, M. S. Caycedo Riaño, R. A. Guzmán, O. Varón Giraldo, and S. M. Ruiz Conde, “Estrategias de mejoramiento a partir de la responsabilidad social y ambiental en los procesos de producción en la agroindustria arrocera del sur oriente del Tolima,” 2019.
- [13] “Aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz.” 2017.

- [14] A. Prada and C. E. Cortés, “La descomposición térmica de la cascarilla de arroz : una alternativa de aprovechamiento integral Thermal decomposition of rice husk : an alternative integral use,” *Rev. ORINOQUIA*, vol. 14, no. 1, pp. 155–170, 2010.
- [15] A. Bernal Vargas and L. P. Carvajal Cano, “Evaluación De Un Biocomposito Elaborado Con Residuos Agroindustriales Del Cultivo De Arroz ( Cascarilla Y Tamo ) Y Su Potencial Aplicación En Viviendas De Interés Social , Paz Evaluación De Un Biocomposito Elaborado Con Residuos Agroindustriales Del Culti,” p. 123, 2019, [Online] Disponible: [https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2141/Bernal\\_Vargas\\_Antonella\\_\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2141/Bernal_Vargas_Antonella__2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [16] S. Thiyageshwari, P. Gayathri, R. Krishnamoorthy, R. Anandham, and D. Paul, “Exploration of rice husk compost as an alternate organic manure to enhance the productivity of blackgram in typic haplustalf and typic rhodustalf,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 2, 2018, doi: 10.3390/ijerph15020358.
- [17] C. A. García Morales, “Cacao y sus derivados.” 2017.
- [18] S. Orozco Colorado, “Apoyo al mejoramiento del sistema productivo de la asociación acefuver,” 2020.
- [19] “Residuos del cacao como fuente para obtener nanocelulosa | UPB.” Universidad Pontificia Bolivariana, 2019, [Online] Disponible: <https://www.upb.edu.co/es/noticias/residuos-cacao-como-fuente-para-obtener-nanocelulosa-upb>.
- [20] C. Mejía, M. Caastro, L. Carvajal, H. Castrillón, and N. Puerta, *Agroindustria Del Cacao*. 2017.
- [21] C. Ardila Suárez and S. C. Carreño Jerez, “Aprovechamiento de la cáscara de la mazorca de cacao como adsorbente,” 2011.
- [22] E. Cienfuegos Jovellanos Fernández, “Estudio del contenido de compuestos bioactivos del cacao y su aplicación en la obtención de un ingrediente rico en (poli)fenoles para el diseño de un chocolate enriquecido,” *Proy. Investig.*, 2016.
- [23] W. Teneda, “Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao (*Theobroma cacao* L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51,” *Univ. Int. Andalucía*, p. 140, 2016, [Online] Disponible: <https://url2.cl/VB8Tk>.
- [24] K. L. Ortiz-Valbuena and R. Álvarez-León, “Efecto del vertimiento de subproductos del beneficio de cacao (*Theobroma cacao* L.) sobre algunas propiedades químicas y biológicas

- en los suelos de una finca cacaotera, municipio de Yaguará (Huila, Colombia),” *Bol. Cient. del Cent. Museos*, vol. 19, no. 1, pp. 65–84, 2015, doi: 10.17151/bccm.2015.19.1.5.
- [25] T. P. Ramos-Ramos, D. J. Guevara-Llerena, L. B. Sarduy-Pereira, and K. Diéguez-Santana, “Producción Más Limpia Y Ecoeficiencia En El Procesado Del Cacao: Un Caso De Estudio En Ecuador,” *Investig. Desarro.*, vol. 20, no. 1, pp. 135–146, 2020, doi: 10.23881/idupbo.020.1-10i.
- [26] T. M. Bernal Cedillo, “Revalorización de residuos de la Industria de Chocolate para la obtención de biomoléculas de interés industrial a partir de la cascarilla de cacao,” 2021.
- [27] M. Lozano, “Utilización de los subproductos del beneficio del cacao: una revisión,” pp. 6–17, 2020.
- [28] K. Cury R, Y. Aguas M, A. Martínez M, R. Olivero V, and L. Chams Ch, “Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento,” *Rev. Colomb. Cienc. Anim. - RECIA*, vol. 9, no. S1, pp. 122–132, 2017, doi: 10.24188/recia.v9.ns.2017.530.
- [29] Y. D. C. Velásquez Riascos and J. E. López, “Estudio de prefactibilidad para el diseño de una planta de etanol a partir de residuos de cosecha de caña de azúcar,” *Rev. Mutis*, vol. 6, no. 2, pp. 74–81, 2016, doi: 10.21789/22561498.1152.
- [30] E. Lagos and E. Castro, “Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes,” *Agron. Mesoam.*, vol. 30, no. 3, pp. 917–933, 2019, doi: 10.15517/am.v30i3.34668.
- [31] T. Ray, “Relación-carbono-nitrógeno-en-compostas.” 2018.
- [32] FNFP and Fedepapa, “Boletín Regional No.05,” *Fed. Colomb. Prod. Papa-Fondo Nac. Fom. la Papa*, no. 04, pp. 1–6, 2020, [Online] Disponible: <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2020/05/BOLETIN-REGIONAL-NACIONAL-2020.pdf>.
- [33] Aucla, “Propuesta de mejora para la disminución de los desperdicios de materia prima en la línea de producción de papa a la francesa, de la procesadora y comercializadora de alimentos, la tocanita.,” *Αγαη*, vol. 8, no. 5, p. 100, 2019.
- [34] J. Jaramillo and I. Ramírez, “Descripción de los procesos para el manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos de la papa generados en la producción de papa francesa en la empresa McCain Food.” 2016, [Online] Disponible: [https://issuu.com/maosabo/docs/descripci\\_\\_n\\_de\\_los\\_procesos\\_para\\_e](https://issuu.com/maosabo/docs/descripci__n_de_los_procesos_para_e).

- [35] S. K. Khanal, T. G. T. Nindhia, and S. Nitayavardhana, *Biogas from wastes: Processes and applications*. Elsevier B.V., 2019.
- [36] J. Quispe, “Obtención y caracterización de la fibra dietética a partir de los residuos de papa (*Solanum tuberosum*),” *Llanco Sedano, James Humberto.*, no. 25265, p. 79, 2014, [Online] Disponible: [repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/733%0A](http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/733%0A).
- [37] Bach Isique Valverde, M. Y. Javier Bach SING LEZAMA, and J. Luis, “Influencia de la hidrólisis química en las características fisicoquímicas y funcionales de los residuos industriales de papa, camote y yuca,” 2017.
- [38] R. Prada, “Alternativa de aprovechamiento eficiente de recursos biodegradables: El caso del almidón residual derivado de la industrialización de la papa,” *Bogotá tuber*, p. 11, 2008.
- [39] Arango Vargas A.M., “Efectos Ambientales Ocasionados por la Técnica del Embolsado de Plátano en la Producción Agrícola del Municipio de Ulloa – Valle.,” *Técnica del embolsado plátano en la Prod. agrícola*, pp. 1–41, 2015, [Online] Disponible: [http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2448/ARANGO\\_ANGELICA\\_2015.pdf?sequence=2](http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2448/ARANGO_ANGELICA_2015.pdf?sequence=2).
- [40] K. Moreira, “Reutilización de residuos de la cáscara de bananos (*musa paradisiaca*) y plátanos (*musa sapientum*) para la producción de alimentos destinados al consumo humano,” *SSRN Electron. J.*, vol. 1, no. 2, p. 121, 2013, [Online] Disponible: <http://www.eldis.org/vfile/upload/1/document/0708/DOC23587.pdf%0Ahttp://socserv2.socsci.mcmaster.ca/~econ/ugcm/3ll3/michels/polipart.pdf%0Ahttps://www.theatlantic.com/magazine/archive/1994/02/the-coming-anarchy/304670/%0Ahttps://scholar.google.it/scholar?q=Scha>.
- [41] A. M. Olmos Soler, “Cadena productiva del plátano departamento de Casanare,” *Gob. del Casanare*, no. 0308, pp. 1–23, 2015, [Online] Disponible: <http://www.casanare.gov.co/?idcategoria=37815>.
- [42] M. Carvajal and F. Murgueitio, “Caracterización de las proteínas de la cáscara de plátano tipo williams,” *Occup. Med. (Chic. Ill.)*, vol. 53, no. 4, p. 130, 2017.
- [43] Dirección de Cadenas Agrícolas y forestales, “Cadena de plátano,” *Minagricultura*, p. 21, 2020.
- [44] EFSA, “Banano , banana,” *Nutrición*, pp. 295–296, 2019, [Online] Disponible: <http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/platano.pdf>.

- [45] G. K. Latinwo and S. E. Agarry, “Modelling the kinetics of biogas production from mesophilic anaerobic co-digestion of cow dung with plantain peels,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 4, no. 1, pp. 55–63, 2015, doi: 10.14710/ijred.4.1.55-63.
- [46] N. Canales and M. Trujillo, “La red de valor de la yuca y su potencial en la bioeconomía de Colombia,” *Inst. Ambient. Estocolmo*, pp. 1–30, 2021, [Online] Disponible: <https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2021/05/workingpaperyucabioeconomia-canalestrujillo-mayo21.pdf>.
- [47] R. Lin, J. Cheng, and J. D. Murphy, “Unexpectedly low biohydrogen yields in co-fermentation of acid pretreated cassava residue and swine manure,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 151, no. July, pp. 553–561, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.006.
- [48] Y. Román, N. Techeira, J. Yamarte, Y. Ibarra, and M. Fasendo, “Caracterización físico-química y funcional de los subproductos obtenidos durante la extracción del almidón de musáceas, raíces y tubérculos,” *Interciencia*, vol. 40, no. 5, pp. 350–356, 2015.
- [49] N. K. Kortei, V. P. Dzogbefia, and M. Obodai, “Assessing the Effect of Composting Cassava Peel Based Substrates on the Yield, Nutritional Quality, and Physical Characteristics of *Pleurotus ostreatus* (Jacq. ex Fr.) Kummer,” *Biotechnol. Res. Int.*, vol. 2014, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1155/2014/571520.
- [50] A. Pinto, “Sector lechero en Colombia: Potencial desperdiciado - ANEIA - Universidad de Los Andes,” Universidad de los Andes, Facultad de Administración. p. 2, 2017, [Online] Disponible: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2017/09/22/sector-lechero-en-colombia-potencial-desperdiciado/>.
- [51] “Leche y derivados\_ Composición y Propiedades - Edualimentaria.” .
- [52] Aqualimpia Engineering, “Plantas depuradoras y biodigestores para el tratamiento de aguas residuales de la industria de lácteos - Biodigestores - plantas de biogás - generadores - energía.” 2021, [Online] Disponible: <https://www.aqualimpia.com/biodigestores/lacteos/>.
- [53] H. S. R. Robalino, “Evaluación de la Actividad Biológica y Nutricional del Biol en Diferentes Formulaciones y la Respuesta a su Aplicación en Cultivos de Arroz (*Oriza sativa*) y Maíz (*Zae mays*), en Guayas,” Tesis para la obtención Maest. en Biotecnología Agrícola, pp. 26–40, 2011, [Online] Disponible: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/88958/D-79469.pdf>.
- [54] Prolactea Entrepinares Group, “Suero de leche – Prolactea.”.

- [55] D. Figueroa, P. Mejia, and J. Gutiérrez, “Evaluación económica del aprovechamiento de residuos líquidos de la producción de cerveza,” p. 56, 2018.
- [56] Y. Cruz, E. Cadena, and J. Aranco, “Procesamiento de la cascarilla de cebada cervecera por vía enzimática para la obtención de azúcares fermentables.” 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000400041.
- [57] S. Torrente, “Aprovechamiento de los subproductos generados en la industria cervecera,” *Fac. Farm. Univ. Comput.*, pp. 1–20, 2019, [Online] Disponible: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/SANDRA ESTEBAN TORRENTE.pdf>.
- [58] C. L. Loviso and D. Libkind, “Synthesis and regulation of flavor compounds derived from brewing yeast: fusel alcohols,” *Rev. Argent. Microbiol.*, vol. 51, no. 4, pp. 386–397, 2019, doi: 10.1016/j.ram.2018.08.006.
- [59] T. Fedna and S. H. S. Calsamiglia, “Bagazo de cerveza: un subproducto con múltiples aplicaciones,” *Bach*, pp. 17–19, 2018.
- [60] Y. F. Cortés, K. D. S. Rodríguez, and L. A. V. Marín, “Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados,” *Prod. y Limpia*, vol. 15, no. 1, pp. 93–110, 2020, doi: 10.22507/PML.V15N1A7.
- [61] N. Fierro-Cabrales, A. Contreras-Oliva, O. González-Ríos, E. S. Rosas-Mendoza, and V. Morales-Ramos, “Caracterización química y nutrimental de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.) chemical and nutritional characterization of coffee pulp (*Coffea arabica* L.),” *Agroproductividad*, vol. 11, no. 4, pp. 9–13, 2018, [Online] Disponible: <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/261>.
- [62] N. Echavarría, N. Atehortúa, and O. Tobón, “Manual de gestión de recurso hídrico sector cafetero,” *Piscícola*, pp. 1–67, 2016.
- [63] M. A. Hernández, A. J. González, F. Suárez, C. Ochoa, A. M. Candela, and I. Cabeza, “Assessment of the biohydrogen production potential of different organic residues in Colombia: Cocoa waste, pig manure and coffee mucilage,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 65, no. June, pp. 247–252, 2018, doi: 10.3303/CET1865042.
- [64] M. Días, “Aproveitamento De Resíduos Do Processamento De Café Para Produção De Carotenoides Por Leveduras E Bactérias,” p. 122, 2016, [Online] Disponible: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8444>.

- [65] A. Samayoa, B. Borrayo, A. Pérez, M. María, and L. Montenegro, “Extracción de mucilago, azúcares, y taninos de la pulpa del café y producción de ácido acético comercial a partir de las mieles del café,” p. 78, 2014, [Online] Disponible: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06\\_3706.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3706.pdf).
- [66] A. Camargo García and C. A. Escobar Cárdenas, “Diseño de un banco de pruebas para la determinación de las pérdidas de carga con variación de temperatura en agua,” vol. 8, p. 55, 2019.
- [67] G. Balachander, N. Khanna, and D. Das, *Biohydrogen Production from Organic Wastes by Dark Fermentation*, 1st ed., vol. #volume#. Elsevier B.V., 2013.
- [68] F. Toscano Villicaña, “Producción de hidrógeno a partir de residuos agroindustriales,” 2012.
- [69] V. Redondas Monteserín, “Obtención de hidrógeno mediante la fermentación oscura de residuos de comida y lactosuero,” pp. 1–249, 2013, [Online] Disponible: [https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/3276/tesis\\_b0e546.PDF?sequence=1](https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/3276/tesis_b0e546.PDF?sequence=1).
- [70] D. Prabakar et al., “Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: Outlook and prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, no. August, pp. 306–324, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.006.
- [71] B. S. Dhanya, A. Mishra, A. K. Chandel, and M. L. Verma, “Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy,” *Sci. Total Environ.*, vol. 723, p. 138109, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138109.
- [72] M. del P. Anzola Rojas, M. Zaiat, and W. L. Silva, “Influence of the Carbon/Nitrogen Ratio on the Hydrogen Production in a Fixed-bed Anaerobic Reactor,” *18th World Hydrog. Energy Conf.*, vol. 78–2, pp. 183–188, 2010.
- [73] M. Del Pilar Anzola-Rojas, S. G. Da Fonseca, C. C. Da Silva, V. M. De Oliveira, and M. Zaiat, “The use of the carbon/nitrogen ratio and specific organic loading rate as tools for improving biohydrogen production in fixed-bed reactors,” *Biotechnol. Reports*, vol. 5, no. 1, pp. 46–54, 2015, doi: 10.1016/j.btre.2014.10.010.
- [74] M. F. Abdullah, J. Md Jahim, P. M. Abdul, and S. S. Mahmud, “Effect of carbon/nitrogen ratio and ferric ion on the production of biohydrogen from palm oil mill effluent (POME),” *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 23, p. 101445, 2020, doi: 10.1016/j.bcab.2019.101445.
- [75] G. Peixoto, “Produção de hidrogênio em reator anaeróbico de leito fixo e fluxo ascendente a partir de água residuária de indústria de refrigerantes,” p. 282, 2008.

- [76] R. Sivaramakrishnan et al., “Insights on biological hydrogen production routes and potential microorganisms for high hydrogen yield,” *Fuel*, vol. 291, no. June 2020, p. 120136, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120136.
- [77] P. C. Hallenbeck, *Fundamentals of Biohydrogen*, 1st ed., vol. #volume#. Copyright © 2013 Elsevier BV. All rights reserved., 2013.
- [78] S. A. Blanco Londoño and T. R. Chaparro, “Biohydrogen production from wastes via dark fermentation: A critical review (1993-2011),” *Ingeniare*, vol. 20, no. 3, pp. 398–411, 2012, doi: 10.4067/s0718-33052012000300014.
- [79] I. K. Kapdan and F. Kargi, “Bio-hydrogen production from waste materials,” *Enzyme Microb. Technol.*, vol. 38, no. 5, pp. 569–582, 2006, doi: 10.1016/j.enzmictec.2005.09.015.
- [80] M. Cui, Z. Yuan, X. Zhi, and J. Shen, “Optimization of biohydrogen production from beer lees using anaerobic mixed bacteria,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 19, pp. 7971–7978, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.022.
- [81] J. Wang and Y. Yin, “Clostridium species for fermentative hydrogen production: An overview,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 70, pp. 34599–34625, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.052.
- [82] C. Boileau et al., “Hydrogen production by the hyperthermophilic bacterium *Thermotoga maritima* part I: Effects of sulfured nutrients, with thiosulfate as model, on hydrogen production and growth,” *Biotechnol. Biofuels*, vol. 9, no. 1, pp. 1–17, 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0678-8.
- [83] A. Geng, Y. He, C. Qian, X. Yan, and Z. Zhou, “Effect of key factors on hydrogen production from cellulose in a co-culture of *Clostridium thermocellum* and *Clostridium thermopalmarium*,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 11, pp. 4029–4033, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.042.
- [84] A. Davin-Regli and J. M. Pagès, “*Enterobacter aerogenes* and *Enterobacter cloacae*; Versatile bacterial pathogens confronting antibiotic treatment,” *Front. Microbiol.*, vol. 6, no. MAY, pp. 1–10, 2015, doi: 10.3389/fmicb.2015.00392.
- [85] A. Khalifa, “*Enterobacter*,” *Benef. Microbes Agro-Ecology*, pp. 259–270, 2020, doi: 10.1016/b978-0-12-823414-3.00014-9.

- [86] R. Rao and N. Basak, "Optimization and modelling of dark fermentative hydrogen production from cheese whey by *Enterobacter aerogenes* 2822," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 2, pp. 1777–1800, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.142.
- [87] Y. Shi et al., "Klebsiella," *Benef. Microbes Agro-Ecology*, pp. 233–257, 2020, doi: 10.1016/b978-0-12-823414-3.00013-7.
- [88] N. Khanna, S. M. Kotay, J. J. Gilbert, and D. Das, "Improvement of biohydrogen production by *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08 under regulated pH," *J. Biotechnol.*, vol. 152, no. 1–2, pp. 9–15, 2011, doi: 10.1016/j.jbiotec.2010.12.014.
- [89] S. L. Percival and D. W. Williams, "Escherichia coli," in *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks: Second Edition, Second Edi.*, Elsevier, 2013, pp. 89–117.
- [90] T. Escherich, "Escherichia coli," *Infect. Dis. Obstet. Gynecol. Sixth Ed.*, pp. 230–232, 2008, doi: 10.5005/jp/books/12695\_18.
- [91] D. Szymanowska-Powalowska, D. Orczyk, and K. Leja, "Biotechnological potential of *Clostridium butyricum* bacteria," *Brazilian J. Microbiol.*, vol. 45, no. 3, pp. 892–901, 2014, doi: 10.1590/S1517-83822014000300019.
- [92] N. Cassir, S. Benamar, and B. La Scola, "Clostridium butyricum: From beneficial to a new emerging pathogen," *Clin. Microbiol. Infect.*, vol. 22, no. 1, pp. 37–45, 2016, doi: 10.1016/j.cmi.2015.10.014.
- [93] P. Miguel and F. Dias, "Hydrogen production by *Clostridium butyricum*: improving production yields and assessing changes in the cell lipid profile during adaptation to furans and gallic acid," no. November, 2015.
- [94] N. Srivastava et al., "Efficient dark fermentative hydrogen production from enzyme hydrolyzed rice straw by *Clostridium pasteurianum* (MTCC116)," *Bioresour. Technol.*, vol. 238, pp. 552–558, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.04.077.
- [95] J. Masset et al., "Fermentative hydrogen production from glucose and starch using pure strains and artificial co-cultures of *Clostridium* spp.," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 5, 2012, doi: 10.1186/1754-6834-5-35.
- [96] B. G. ATLAS, "Clostridium beijerinckii NCIMB 8052."

- [97] M. Gomez-Flores, G. Nakhla, and H. Hafez, "Hydrogen production and microbial kinetics of *Clostridium termitidis* in mono-culture and co-culture with *Clostridium beijerinckii* on cellulose," *AMB Express*, vol. 7, no. 1, p. 84, 2017, doi: 10.1186/s13568-016-0256-2.
- [98] "Thermotoga neapolitana NS-E | Type strain | DSM 4359, ATCC 49049, NBRC 107923 | BacDiveID:17061." [Online] Disponible: <https://bacdive.dsmz.de/strain/17061>.
- [99] N. Pradhan *et al.*, "Hydrogen Production by the Thermophilic Bacterium *Thermotoga neapolitana*," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 16, no. 6, 2015, doi: 10.3390/ijms160612578.
- [100] NCBI, "The Genome Organization of *Thermotoga maritima* Reflects Its Lifestyle."
- [101] R. Saidi, P. P. Liebgott, M. Hamdi, R. Auria, and H. Bouallagui, "Enhancement of fermentative hydrogen production by *Thermotoga maritima* through hyperthermophilic anaerobic co-digestion of fruit-vegetable and fish wastes," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 52, pp. 23168–23177, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.208.
- [102] BCM, "RRNPP-type quorum-sensing systems regulate solvent formation, sporulation and cell motility in *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* \_ Biotechnology for Biofuels \_ Full Text."
- [103] S. Wang, S. Dong, P. Wang, Y. Tao, and Y. Wang, "Genome editing in *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 with the CRISPR-Cas9 system," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 83, no. 10, pp. 1–44, 2017, doi: 10.1128/AEM.00233-17.
- [104] W. M. Alalayah, M. S. Kalil, A. A. H. Kadhum, J. M. Jahim, and N. M. Alauj, "Hydrogen production using *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 (ATCC 13564)," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 24, pp. 7392–7396, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.09.066.
- [105] LPSN, "Species\_ *Thermotoga elfii*."
- [106] G. Ravot *et al.*, "*Thermotoga elfii* sp. nov., a novel thermophilic bacterium from an African oil-producing well," *Int. J. Syst. Bacteriol.*, vol. 45, no. 2, pp. 308–314, doi: 10.1099/00207713-45-2-308.
- [107] F. P. A. M. Claassen, "Biological hydrogen via fermentation Contributors to presented results: Partners in EET BWP and in FP5 EU BioHydrogen Topics of Biological Hydrogen Production and economic Conversion efficiency for energy production Fermentation product." [Online]. Available: [www.biohydrogen.nl](http://www.biohydrogen.nl).
- [108] S. E. Oh, Y. Zuo, H. Zhang, M. J. Guiltinan, B. E. Logan, and J. M. Regan, "Hydrogen production by *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 and megaplasmid-deficient mutant

- M5 evaluated using a large headspace volume technique,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 23, pp. 9347–9353, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.084.
- [109] F. D. E. Veterinaria, “Actividades celulolíticas, utilización de carbohidratos y producción de etanol por *Clostridium thermocellum*,” 2015.
- [110] “Hydrogen production from cellulose in a two-stage process combining fermentation and electrohydrogenesis.”
- [111] D. Avendaño, J. Ladino, P. Acevedo, and I. Cabeza, “Producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura a partir de RSU de una plaza de mercado en Bogotá,” 2019, [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/11634/19016>.
- [112] C. Lorena and R. Bohórquez, “Estudio de la producción de hidrógeno en régimen batch con agua residual proveniente de la industria cervecera,” pp. 2–69, 2012.
- [113] A. Bedoya, J. C. Castrillón, J. E. Ramírez, J. E. Vásquez, and M. A. Zabala, “Producción biológica de hidrógeno: Una aproximación al estado del arte,” *DYNA (Colombia)*, vol. 75, no. 154, pp. 137–157.
- [114] FINAGRO, “Ficha de inteligencia Caña de Azúcar,” pp. 1–14, 2018, [Online] Disponible: [https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha\\_cana\\_de\\_azucar\\_version\\_ii.pdf](https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha_cana_de_azucar_version_ii.pdf).
- [115] Invias, “Estado de la red vial.”
- [116] DatosMundial, “El mundo en números.” [Online] Disponible: <https://www.datosmundial.com/america/colombia/clima.php>.
- [117] Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible, Boletín Tarifario Contenido. 2020.
- [118] B. E. Rittmann, “Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 100, no. 2, pp. 203–212, 2008, doi: 10.1002/bit.21875.
- [119] B. O. T. Á. Nica and Y. Variedades, “Tecnología azucarera.”
- [120] M. J. Caballero Abellán, “Operaciones de acondicionamiento de materias primas,” *SINTESIS*, 2020.
- [121] Jaidi, “Lavadora por inmersión.” [Online]. Available: <http://tomato-machinery.es/15-1-2-washing-machine.html>.
- [122] J. J. Uribe Pérez and E. Y. Lozano Ramírez, “Desarrollo, construcción y pruebas de funcionamiento de un prototipo de molino de martillos para la trituración en estado seco de

- cáscara de cacao y similares,” p. 634, 2014, [Online] Disponible: <https://hsgm.saglik.gov.tr/depo/birimler/saglikli-beslenme-hareketli-hayat-db/Yayinlar/kitaplar/diger-kitaplar/TBSA-Beslenme-Yayini.pdf>.
- [123] L. Atarama Valdiviezo, “Sistematización De Diseño De Molinos De Martillos Fijos Para Grano,” Univ. Piura, p. 230, 2018.
- [124] J. Salcedo, “Hidrólisis enzimática de residuos de la cosecha de la caña de azúcar (hojas y cogollos) para la producción de etanol,” SSRN Electron. J., vol. 1, no. 2, p. 194, 2013, [Online] Disponible: <http://www.eldis.org/vfile/upload/1/document/0708/DOC23587.pdf%0Ahttp://socserv2.socsci.mcmaster.ca/~econ/ugcm/3ll3/michels/polipart.pdf%0Ahttps://www.theatlantic.com/magazine/archive/1994/02/the-coming-anarchy/304670/%0Ahttps://scholar.google.it/scholar?q=Scha>.
- [125] Znith, “Trituradora de Martillos.” .
- [126] P. Martín Arroyo, “Tecnologías comerciales de hidrólisis térmica de lodos de depuradora : Revisión documental y comparativa,” p. 46, 2015.
- [127] Cienciamx, “Hidrólisis enzimática, etapa indispensable para producir bioetanol.” 2018.
- [128] J. Speight, “Hidrólisis. Mecanismos de reacción en ingeniería ambiental,” pp. 203–229, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-804422-3.00006-7.
- [129] M. Ibrahim Rajoka, “The enzymatic hydrolysis and fermentation of pretreated wheat straw to ethanol,” Biotechnol. Bioeng., vol. 32, no. 6, pp. 771–776, 2006, doi: 10.1002/bit.260320608.
- [130] J. Saucedo, “Diseño de un bioproceso para la obtención de bioetanol anhidro a bagazo del agave tequilana Weber,” pp. 1–9, 2011.
- [131] N. Ramírez, M. Vargas, J. Ariza, and C. Martínez, “Caracterización de la lacasa obtenida por dos métodos de producción con *Pleurotus ostreatus* Ramírez Revista Colombiana de Biotecnología.” [Online] Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/580/1096>.
- [132] O. García, R. Infante, and C. Rivera, “Hacia una definición de fibra alimentaria.” [Online] Disponible: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-07522008000100005](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-07522008000100005).

- [133] Lenntech B.V, “Elementos químicos ordenados por su densidad.” 2021, [Online]. Available: <https://www.lenntech.es/tabla-peiodica/densidad.htm>.
- [134] Goodfellow, “Celulosa (Regenerated Cellulose).” [Online] Disponible: <http://www.goodfellow.com/S/Celulosa.html>.
- [135] C. Gonzales, “Materiales compuestos termoplástico/lignina y su procedimiento de obtención.” .
- [136] L. Lab, “Fermentadores – biorreactores industriales \_ Laval Lab.” p. <http://lavallab.com/es/products/fermentadores-y-bi>, 2015.
- [137] M. A. H. Neri, “Diseño de Tanque de Agitación,” Fund. Univ. Las Américas Puebla, p. 6.
- [138] K. Colunga and M. González, “Diseño De Un Tanque Agitado Para La Etapa De Hidrólisis En La Producción De Miel De Agave | Torres Colunga | Jóvenes En La Ciencia.” p. 5, [Online] Disponible: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/752>.
- [139] L. Anhui Ruixu Mixing Equipment co, “China El rotor (Rushton turbina) para la mezcla de Industrial – Comprar El rotor en es.” [Online] Disponible: [https://es.made-in-china.com/co\\_js-ruixu/product\\_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing\\_ehunoeugg.html](https://es.made-in-china.com/co_js-ruixu/product_Impeller-Rushton-Turbine-for-Industrial-Mixing_ehunoeugg.html).
- [140] I. Harun, J. M. Jahim, N. Anuar, and O. Hassan, “Hydrogen production performance by *Enterobacter cloacae* KBH3 isolated from termite guts,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 20, pp. 15052–15061, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.101.
- [141] P. Bakonyi, N. Nemestóthy, J. Lankó, I. Rivera, G. Buitrón, and K. Bélafi-Bakó, “Simultaneous biohydrogen production and purification in a double-membrane bioreactor system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 4, pp. 1690–1697, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.002.
- [142] A. Martínez, “Estudio de la separación de hidrógeno en una mezcla gaseosa por membranas densas de paladio,” 2018.
- [143] Z. Pientka, J. Peter, J. Zitka, and P. Bakonyi, “Application of Polymeric Membranes in Biohydrogen Purification and Storage,” *Curr. Biochem. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 99–105, 2014, doi: 10.2174/2212711901999140522112914.
- [144] P. Bakonyi, G. Kumar, N. Nemestóthy, C. Y. Lin, and K. Bélafi-Bakó, “Biohydrogen purification using a commercial polyimide membrane module: Studying the effects of some

- process variables,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 35, pp. 15092–15099, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.133.
- [145] H. and F. C. T. Office, “Hydrogen Storage \_ Department of Energy.” [Online] Disponible: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
- [146] H. and F. C. T. Office, “Physical Hydrogen Storage \_ Department of Energy.” [Online] Disponible: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>.
- [147] Linde, “Hydrogen | Linde Engineering.”
- [148] E. López, “Definición de criterios de diseño de instalaciones de almacenamiento de hidrógeno producido con energías renovables,” *T.Doctotral*, p. 265, 2013.
- [149] Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, “How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?” *Key Components of a Hydrogen Fuel Cell Electric Car*, 2017. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>.
- [150] Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, “Fuel Cell Electric Vehicles,” 2015. [Online]. Available: [https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel\\_cell.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html).
- [151] V. Capdevila, V. Kafarov, C. Gely, and A. Pagano, “Simulation of the Fermentation Process to Obtain Bioethanol from Rice Residues,” vol. 6, no. 2, pp. 11–21, 2015.
- [152] C. Qi, S. Hou, J. Lu, W. Xue, and K. Sun, “Thermal characteristics of birch and its cellulose and hemicelluloses isolated by alkaline solution,” *Holzforschung*, vol. 74, no. 12, pp. 1099–1112, 2020, doi: 10.1515/hf-2019-0285.
- [153] Z. Michael, Z. Ruan, M. Bustamante, Y. Liu, and W. Liao, “A sustainable lignocellulosic biodiesel production integrating solar and biopower generation,” *Gene Regul. Metab.*, pp. 1–17, 2018, doi: 10.7551/mitpress/3215.003.0017.
- [154] Yaws, Carl L. (2009). *Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals*. Knovel. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpYHTPHC09/yaws-handbook-thermodynamic/yaws-handbook-thermodynamic>
- [155] C. Salazar-Posada, A. López-Padilla, and J. A. Cano-Salazar, “Efecto del pH y la temperatura en la hidrólisis enzimática de subproductos de la industria bovina,” *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 9, no. 2, pp. 26–32, 2013.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1.

### RECOMENDACIONES

Una vez realizada la hidrólisis del residuo agroindustrial es necesario verificar su pH y realizar un ajuste si se encuentra fuera del rango necesario para seguir a la siguiente etapa de la fermentación. El pH del cogollo de caña de azúcar generalmente es igual a 7 antes de entrar a la hidrólisis, pero al salir de esta etapa es necesario realizar las respectivas mediciones y conocer su valor. El ajuste de ajuste del pH se realiza por medio de la adición de NaOH y HCl según sea el caso. [155]

La selectividad de la membrana no es suficiente para establecer una buena separación y purificación, se debe tener en cuenta la composición del gas, la proporción del material retenido y el flujo de alimentación, ya que de estos factores también depende la eficiencia de la separación, por lo tanto, es necesario conocer estos factores al igual que los flujos, cantidades y composiciones exactas para hacer su dimensionamiento a nivel industrial, ya que aún está en estudio la implementación de estas membranas para el proceso.

Si se desarrolla el presente trabajo de manera experimental, se debe realizar un estudio de la transferencia de calor para calcular el calor exacto en la hidrólisis y la fermentación, ya que en nuestro caso se calculó la transferencia de calor solo con la materia de cada etapa mas no con la enzima y microorganismo, por desconocimiento de sus respectivos valores de las capacidades caloríficas.

Por último, para dar un uso adecuado a los subproductos (como alcoholes y ácidos) producidos por la bacteria *E. cloacae* a lo largo de la fermentación se recomienda una profundización sobre el estudio de la implementación de un consorcio de microorganismos que consuman estos componentes, de manera que se aprovechen sin alterar la producción de hidrógeno. Igualmente, se debe considerar el almacenamiento del CO<sub>2</sub> como efluente de la etapa de separación y purificación de hidrógeno, para que pueda ser usado en procesos industriales y evitar liberarlo a la atmósfera, lo cual puede generar problemas ambientales.

## ANEXO 2.

### FICHA TÉCNICA LAVADORA POR INMERSIÓN *JIADI*.



#### Lavadora por inmersión

Se utiliza la lavadora por inmersión para lavar productos agropecuarios como manzanas, cebollas, zanahorias, vegetales en escabeche, entre otros tipos. Se reduce mucho el consumo energético debido al método de transporte hidráulico. La bomba aumenta los niveles de oxígeno, y es por esto que las frutas y verduras se someten a procesamientos ultrasónicos. Esto permite que la limpieza se lleve a cabo de manera exitosa sin que se dañen. Luego, se lleva a cabo una limpieza por rocío. Además, posee un diseño que permite juntar piedras y arenas en la parte inferior de la descarga. Se utiliza acero inoxidable y se suelda con tecnología de última generación para producir la lavadora por inmersión.



#### Especificaciones

Modelo	JD-fx-5	JD-fx-10	JD-fx-15	JD-fx-20	JD-fx-30	JD-fx-40
Capacidad (kg)	5000	10000	15000	20000	30000	40000
Potencia (kw)	1.5	2.2	3	3.8	5.5	7.6
Dimensiones (mm)	3000×700×1400	3500×800×1400	4000×900×1400	4500×1000×1400	5000×1100×1400	6000×1200×1400
Material	304/316/443	304/316/443	304/316/443	304/316/443	304/316/443	304/316/443

Jiadi ofrece una variedad de productos, como lavadoras por inmersión, esterilizadores, llenadoras asépticas, entre muchos más.

Nombres relacionados

Lavadora de frutas | Lavadora de verduras | Lavadora de acero inoxidable

## ANEXO 3.

### FICHA TÉCNICA TRITURADORA DE MARTILLOS ZINTH.



# Trituradora de Martillos



Trituradora de martillos diseñada por Zinth se ajusta para producir productos de polvo grueso de 0-3mm. Esta máquina adopta las teorías tradicionales de trituradoras y molinos. Es la mejor opción para producir polvo grueso con gran capacidad.

## Características

- 1. Alta producción y alta proporción de trituración.
- 2. Bajo consumo de energía, tamaño homogéneo de partícula.
- 3. Estructura simple, compacta y ligera.
- 4. Bajo costo de inversión, fácil de gestión.

## Aplicación

Trituradora de martillos es principalmente conveniente para la trituración de los minerales blandos y de dureza media, cuya resistencia a la compresión es menos de 320MPa, tales como el carbón, sal, tiza, yeso, bloques, caliza, cristal, fosfato, etc.

## Datos Técnicos

Modelo	Diametro de Rotor (mm)	Longitud de Rotor (mm)	Cantidad de Martillos	Alimentación Máxima (mm)	Descarga(mm)	Capacidad (t/h)	Potencia(kW)
PC300×400	400×300	16	<100	<15	3-8	11	1100
PC400×600	600×400	20	<150	<15	8-15	18.5	1000
PC600×800	800×600	28	<220	<20	15-30	45	900

## ANEXO 4.

### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD ENZIMA LACASA SIGMA ALDRICH.

**Sigma-Aldrich.**

www.sigmaaldrich.com

#### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 6.3

Fecha de revisión 07.09.2021

Fecha de impresión 09.12.2021

GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

#### SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

##### 1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : LACCASE FROM ASPERGILLUS SP.

Referencia : SAE0050

Marca : Sigma

No. Índice : 647-017-00-5

REACH No. : Este producto es una mezcla. Número de registro REACH véase sección 3.

##### 1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

##### 1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
3050 SPRUCE ST  
ST. LOUIS MO 63103  
UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765

Fax : +1 800 325-5052

##### 1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-  
527-3887 CHEMTREC (International) 24  
Hours/day; 7 Days/week

#### SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

##### 2.1 Classification of the substance or mixture

###### Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008

Respiratory sensitization (Category 1), H334

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

##### 2.2 Label elements

###### Labelling according Regulation (EC) No 1272/2008

Pictogram



Signal word

Danger

Sigma- SAE0050

Página 1 de 9

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



Hazard statement(s) H334	May cause allergy or asthma symptoms or breathing difficulties if inhaled.
Precautionary statement(s) P261 P284 P501	Avoid breathing dust/ fume/ gas/ mist/ vapors/ spray. Wear respiratory protection. Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant.
Supplemental Hazard Statements	none

### 2.3 Otros Peligros

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (vPvB) a niveles del 0,1% o superiores.

---

## SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

### 3.2 Mezclas

Sinónimos : Novozym 51003

Componente	Clasificación	Concentración
<b>Laccase</b>		
No. CAS	80498-15-3	Resp. Sens. 1; H334 >= 1 - < 10 %
No. CE	420-150-4	
No. Índice	647-017-00-5 *	

\*No hay disponible un número de registro para esta sustancia, ya que la sustancia o su uso están exentos del registro; según el artículo 2 del Reglamento REACH (CE) núm. 1097/2006, el tonelaje anual no requiere registro o dicho registro está previsto para una fecha posterior.

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

---

## SECCIÓN 4. Primeros auxilios

### 4.1 Descripción de los primeros auxilios

#### Recomendaciones generales

El socorrista necesita protegerse a si mismo. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

#### Si es inhalado

Tras inhalación: aire fresco. Llamar al médico.

#### En caso de contacto con la piel

En caso de contacto con la piel: Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ducharse.

#### En caso de contacto con los ojos

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Retirar las lentillas.



**Por ingestión**

Tras ingestión: hacer beber agua inmediatamente (máximo 2 vasos). Consultar a un médico.

**4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados**

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta (ver sección 2.2) y / o en la sección 11

**4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**

Sin datos disponibles

---

**SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios****5.1 Medios de extinción****Medios de extinción apropiados**

Agua Espuma Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) Polvo seco

**Medios de extinción no apropiados**

No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.

**5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla**

Óxidos de carbono

Inflamable.

En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos.

**5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios**

En caso de fuego, protéjase con un equipo respiratorio autónomo.

**5.4 Otros datos**

Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

---

**SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental****6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**

Indicaciones para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia: No respirar los vapores, aerosoles. Evitar el contacto con la sustancia. Asegúrese una ventilación apropiada. Evacúe el área de peligro, respete los procedimientos de emergencia, consulte con expertos.

Equipo de protección individual, ver sección 8.

**6.2 Precauciones relativas al medio ambiente**

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

**6.3 Métodos y material de contención y de limpieza**

Cubra las alcantarillas. Recoja, una y aspire los derrames. Observe posibles restricciones de materiales (véanse indicaciones en las secciones 7 o 10). Recoger cuidadosamente con agentes absorbentes de líquidos, p.ej. Chemisorb®. Añadir a residuos a tratar.

Aclarar.

**6.4 Referencia a otras secciones**

Para eliminación de desechos ver sección 13.



---

## **SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento**

### **7.1 Precauciones para una manipulación segura**

#### **Consejos para una manipulación segura**

Trabajar bajo campana extractora. No inhalar la sustancia/la mezcla. Evítese la generación de vapores/aerosoles.

#### **Medidas de higiene**

Sustituir la ropa contaminada. Es recomendable una protección preventiva de la piel. Lavar las manos al término del trabajo.

Ver precauciones en la sección 2.2

### **7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**

#### **Condiciones de almacenamiento**

Bien cerrado. Mantenerlo encerrado en una zona unicamente accesible por las personas autorizadas o calificadas.

#### **Estabilidad en almacén**

Temperatura de almacenaje recomendada  
2 - 8 °C

Sensible a la luz.

#### **Clase de almacenamiento**

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 10: Combustibles líquidos

### **7.3 Usos específicos finales**

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

---

## **SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual**

### **8.1 Parámetros de control**

**Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.**

### **8.2 Controles de la exposición**

#### **Protección personal**

##### **Protección de los ojos/ la cara**

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).  
Gafas de seguridad

##### **Protección de la piel**

precisa

##### **Protección Corporal**

prendas de protección

##### **Protección respiratoria**

necesaria en presencia de vapores/aerosoles.

Nuestras recomendaciones sobre protección respiratoria se basan en las normas siguientes: DIN EN 143, DIN 14387 y otras normas relativas al uso de la protección respiratoria usada.

Tipo de Filtro recomendado: Filtro tipo ABEK



El empresario debe garantizar que el mantenimiento, la limpieza y la prueba técnica de los protectores respiratorios se hagan según las instrucciones del productor de las mismas. Estas medidas deben ser documentadas debidamente.

#### **Control de exposición ambiental**

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

---

### **SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas**

#### **9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas**

a) Aspecto	Forma: líquido
b) Olor	Sin datos disponibles
c) Umbral olfativo	Sin datos disponibles
d) pH	Sin datos disponibles
e) Punto de fusión/ punto de congelación	Sin datos disponibles
f) Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	Sin datos disponibles
g) Punto de inflamación	Sin datos disponibles
h) Tasa de evaporación	Sin datos disponibles
i) Inflamabilidad (sólido, gas)	Sin datos disponibles
j) Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos	Sin datos disponibles
k) Presión de vapor	Sin datos disponibles
l) Densidad de vapor	Sin datos disponibles
m) Densidad	1,05 gcm <sup>3</sup>
Densidad relativa	Sin datos disponibles
n) Solubilidad en agua	a 20 °C soluble
o) Coeficiente de reparto n- octanol/agua	Sin datos disponibles
p) Temperatura de auto-inflamación	Sin datos disponibles
q) Temperatura de descomposición	Sin datos disponibles
r) Viscosidad	Viscosidad, cinemática: Sin datos disponibles Viscosidad, dinámica: Sin datos disponibles
s) Propiedades explosivas	Sin datos disponibles
t) Propiedades comburentes	Sin datos disponibles



## 9.2 Otra información de seguridad

Sin datos disponibles

---

## SECCIÓN 10. Estabilidad y reactividad

### 10.1 Reactividad

Sin datos disponibles

### 10.2 Estabilidad química

El producto es químicamente estable bajo condiciones normales (a temperatura ambiental).

### 10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

Sin datos disponibles

### 10.4 Condiciones que deben evitarse

información no disponible

### 10.5 Materiales incompatibles

Agentes oxidantes fuertes

### 10.6 Productos de descomposición peligrosos

En caso de incendio: véase sección 5

---

## SECCIÓN 11. Información toxicológica

### 11.1 Información sobre los efectos toxicológicos

#### Mezcla

#### Toxicidad aguda

Oral: Sin datos disponibles

Inhalación: Sin datos disponibles

Cutáneo: Sin datos disponibles

#### Corrosión o irritación cutáneas

Sin datos disponibles

#### Lesiones o irritación ocular graves

Sin datos disponibles

#### Sensibilización respiratoria o cutánea

Mezcla puede provocar síntomas de alergia o asma o dificultades respiratorias en caso de inhalación.

#### Mutagenicidad en células germinales

Sin datos disponibles

#### Carcinogenicidad

Sin datos disponibles

#### Toxicidad para la reproducción

Sin datos disponibles

#### Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

Sin datos disponibles

#### Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas

Sin datos disponibles

#### Peligro de aspiración

Sin datos disponibles

Sigma- SAE0050

Página 6 de 9

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



## 11.2 Información Adicional

Según nuestras informaciones, creemos que no se han investigado adecuadamente las propiedades químicas, físicas y toxicológicas.  
No pueden excluirse características peligrosas, pero son poco probables si su manipulación es adecuada.

### Componentes

#### Laccase

##### Toxicidad aguda

DL50 Oral - Rata - machos y hembras - > 1.350 mg/kg  
Inhalación: Sin datos disponibles  
Cutáneo: Sin datos disponibles

##### Corrosión o irritación cutáneas

Piel - Conejo  
Resultado: No irrita la piel - 4 h  
(Directrices de ensayo 404 del OECD)

##### Lesiones o irritación ocular graves

Ojos - Conejo  
Resultado: No irrita los ojos  
(Directrices de ensayo 405 del OECD)

##### Sensibilización respiratoria o cutánea

Sin datos disponibles

##### Mutagenicidad en células germinales

Tipo de Prueba: Prueba de Ames  
Sistema experimental: S.typhimurium  
Resultado: negativo

##### Carcinogenicidad

Sin datos disponibles

##### Toxicidad para la reproducción

Sin datos disponibles

##### Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

Sin datos disponibles

##### Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas

Sin datos disponibles

##### Peligro de aspiración

Sin datos disponibles

---

## SECCIÓN 12. Información ecológica

### 12.1 Toxicidad

#### Mezcla

Sin datos disponibles

### 12.2 Persistencia y degradabilidad

Sin datos disponibles





---

## SECCIÓN 15. Información reglamentaria

### 15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos de la Reglamento (CE) No. 1907/2006.

#### Otras regulaciones

Tomar nota de la Directiva 94/33/CEE sobre la protección laboral de los jóvenes.

### 15.2 Evaluación de la seguridad química

Para este producto no se ha llevado a cabo una evaluación de la seguridad química

---

## SECCIÓN 16. Otra información

### Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3.

H334                      May cause allergy or asthma symptoms or breathing difficulties if inhaled.

#### Otros datos

La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. La información contenida en este documento esta basada en el presente estado de nuestro conocimiento y es aplicable a las precauciones de seguridad apropiadas para el producto. No representa ninguna garantía de las propiedades del producto. La Corporación Sigma-Aldrich y sus Compañías Afiliadas, no responderán por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Dirijase a [www.sigma-aldrich.com](http://www.sigma-aldrich.com) y/o a los términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega. Copyright 2020 Sigma-Aldrich Co. LLC. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

La marca que aparece en el encabezado y/o el pie de página de este documento puede no coincidir visualmente con el producto adquirido mientras hacemos la transición de nuestra marca. Sin embargo, toda la información del documento relativa al producto permanece sin cambios y coincide con el producto solicitado. Para más información, póngase en contacto con [mlsbranding@sial.com](mailto:mlsbranding@sial.com)

