

**PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE BAGAZO RESIDUAL DE UN PROCESO DE
FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA EN ESCALA PILOTO**

PAULA ANDREA NEIRA TORRES

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA**

Director

MSc. cPhD. DAVID LEONARDO SOTELO

Co - Director

PhD. HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del director

Nombre
Firma del presidente del jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D. C. Octubre de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector de Claustro

Dr. Mario Posada García - Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García - Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavidez Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la facultad de Ingenierías

Dra. Nalily Patricia Guerra Prieto

Director del departamento de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra

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

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, mi inspiración, guía y pilar, por su amor, paciencia y por acompañarme siempre en cada paso de mi vida. Su fortaleza y ejemplo han sido la motivación detrás de cada logro, y a ella debo todo lo que soy. A mis hermanos, por su apoyo incondicional y por estar presentes en cada desafío. A mi papá, por su dedicación inquebrantable y por enseñarme la importancia del esfuerzo. Y a mi angelito Jersey, quien estuvo a mi lado en cada larga noche de trabajo, brindándome su compañía fiel en todo momento.

A mi director de tesis, el Dr. David Leonardo Sotelo, mi sincero agradecimiento por su confianza desde el primer instante y por su dedicación en cada fase del proceso. Su apoyo constante y su disposición para compartir su conocimiento fueron fundamentales para que pudiera enfrentar y superar los desafíos que se presentaron, gracias por brindarme el respaldo y el ánimo necesarios para superar cada obstáculo que surgió en este proceso. De igual forma, al co-director Dr. Harvey Milquez, por su valioso apoyo y orientación, esenciales para la culminación de este trabajo.

A la Universidad, por brindarme el espacio y los recursos necesarios para desarrollar esta investigación, y por formar un entorno que promueve el aprendizaje y la innovación.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	13
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1. Etanol	14
1.1.1. <i>Propiedades Fisicoquímicas</i>	14
1.2. Bioetanol	15
1.3. Determinación De Grado Alcohólico	15
1.3.1. Densímetro (Hidrómetro)	16
1.3.2. Alcohómetro Gay – Lussac	17
1.3.3. <i>Azeótropo Etanol - Agua</i>	18
1.3.4. <i>Aplicaciones Del Etanol.</i>	19
1.4. Caracterización Fisicoquímica	21
1.4.1. <i>Determinación Del Contenido De Humedad</i>	21
1.4.2. <i>Determinación Del Contenido De Cenizas</i>	22
1.5. Fermentación Alcohólica	23
1.5.1. <i>Levaduras</i>	23
1.6. Biomasa Lignocelulósica	24
1.7. Cerveza	25
1.7.1. <i>Proceso De Producción De Cerveza</i>	25
1.7.2. <i>Bagazo De Cerveza</i>	27
1.8. Producción De Etanol	28
1.8.1. <i>Pretratamiento De La Biomasa</i>	29
1.8.2. <i>Hidrólisis Ácida</i>	30
1.8.3. <i>Espectrofotometría</i>	30
1.8.4. <i>Glucólisis</i>	32
1.8.5. <i>Fermentación</i>	33
1.8.6. Destilación	34
1.9. Reactor CSTR	35

1.10.	Controlador De Temperatura De Microcomputadora	36
1.11.	Rotaevaporador	37
2.	METODOLOGÍA Y RESULTADOS	39
2.1.	Pretratamiento De La Biomasa	39
2.2.	Caracterización Fisicoquímica Del Afrecho De Malta	40
2.2.1.	<i>Determinación De Humedad</i>	41
2.2.2.	<i>Determinación De Cenizas</i>	43
2.3.	Estandarización De Las Condiciones De Operación	44
2.3.1.	<i>Preparación De Reactivos</i>	45
2.3.2.	<i>Curva De Calibración</i>	46
2.3.3.	<i>Hidrólisis Ácida En La Escala Laboratorio</i>	51
2.4.	Producción De Etanol En Escalamiento	57
2.4.1.	<i>Controlador de Temperatura</i>	57
2.4.2.	<i>Hidrólisis Ácida En Escalamiento Del Proceso</i>	58
2.4.3.	<i>Fermentación De Azúcares</i>	61
2.4.4.	<i>Destilación De Fermentaciones</i>	67
2.4.5.	<i>Balance de Masa</i>	75
3.	CONCLUSIONES	77
4.	RECOMENDACIONES	83
	REFERENCIAS	86

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Densímetro.	17
Figura 2. Alcoholímetro Gay – Lussac.	18
Figura 3. Diagrama de temperatura vs composición de la mezcla etanol – agua.	20
Figura 4. Proceso de fabricación de cerveza.	29
Figura 5. Características de un controlador de temperatura de microcomputadora.	40
Figura 6. Secado de afrecho de malta.	43
Figura 7. Determinación de humedad de afrecho de malta	44
Figura 8. Soluciones estándar para la curva de calibración de glucosa.	52
Figura 9. Curva de calibración de Glucosa	53
Figura 10. Montaje de hidrólisis ácida.	56
Figura 11. Sistema experimental para hidrólisis ácida en reactor CSTR.	63
Figura 12. Levadura Levapan.	65
Figura 13. Levadura SAFSPIRIT M – 1.	66
Figura 14. Fermentaciones de afrecho de malta.	67
Figura 15. Comportamiento Actividad Fermentativa.	68
Figura 16. Rotaevaporador.	70
Figura 17. Medición de alcohol levadura de whisky. Destilación 2.	72
Figura 18. Medición de alcohol levadura de pan. Destilación (2).	72
Figura 19. Medición grados de alcohol levadura de whisky. Destilación (3) y (4).	74
Figura 20. Medición grados de alcohol levadura de pan. Destilaciones (3) y (4).	76
Figura 21. Comparación de la concentración de alcohol (% v/v) en diferentes destilaciones con dos tipos de levadura.	77

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Determinación de humedad del afrecho de malta	45
Tabla 2. Determinación de cenizas.	46
Tabla 3. Muestras resultantes de la solución intermedia 1.	51
Tabla 4. Muestras resultantes de la solución intermedia 2.	51
Tabla 5. Concentración y absorbancia de las soluciones estándar.	53
Tabla 6. Resultados de las hidrólisis en escala laboratorio.	58
Tabla 7. Resultados de las hidrólisis en escalamiento del proceso.	63
Tabla 8. Actividad fermentativa de levaduras en fermentaciones de pan y whisky.	68
Tabla 9. Rendimiento de azúcares reductores	69
Tabla 10. Destilación simple. Etapa (1) y (2).	71
Tabla 11. Resultados de las destilaciones extractivas de la levadura de whisky.	73
Tabla 12. Resultados de las destilaciones extractivas de la levadura de pan.	74
Tabla 13. Balance de masa y rendimiento global	79

RESUMEN

El proyecto se enfoca en la producción de etanol a partir de afrecho de malta, un subproducto de la industria cervecera, utilizando un proceso de hidrólisis ácida seguido de fermentación y destilación. Se llevaron a cabo 9 hidrólisis a escala de laboratorio, variando el tiempo de reacción (1, 3 y 5 horas), manteniendo constantes la temperatura (80°C) y el pH (1). Las hidrólisis de 3 y 5 horas mostraron los mejores resultados en términos de cantidad de carbohidratos liberados, pero por optimización de tiempo se seleccionó la hidrólisis de 3 horas para el escalamiento del proceso.

Posteriormente, se realizaron dos grupos de fermentaciones, uno con levadura de whisky y otro con levadura de pan, durante 15 días. Se llevaron a cabo 4 destilaciones para cada grupo: dos destilaciones simples y dos destilaciones extractivas usando glicerol. Los resultados mostraron que, utilizando levadura de whisky, se obtuvo etanol con una pureza del 96 % V/V y un rendimiento de 1,94, mientras que con levadura de pan solo se logró una concentración del 54% V/V de etanol y un rendimiento de 0,81.

Estos resultados demuestran la viabilidad de utilizar afrecho de malta para la producción de etanol de manera eficiente y sustentable, especialmente al emplear levadura de whisky. El proyecto destaca la importancia del etanol en diversos sectores industriales, subrayando su impacto en la economía circular y la búsqueda de alternativas sostenibles para el desarrollo, contribuyendo a la diversificación de fuentes de energía renovable y al aprovechamiento de subproductos de la industria cervecera.

Palabras clave: Etanol, afrecho de malta, hidrólisis ácida, fermentación, destilación extractiva.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles y renovables ha incentivado el aprovechamiento de residuos agroindustriales [1], destacando entre ellos el bagazo residual de procesos de fermentación alcohólica. Este subproducto es una valiosa fuente de azúcares fermentables para la obtención de etanol carburante, ya que es rico en celulosa, hemicelulosa y lignina [2], convirtiéndolo en una materia prima esencial para la producción de biocombustibles que contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero debido a su origen renovable impulsando una economía más limpia y eficiente.

Es en este contexto que el presente proyecto busca estandarizar y optimizar las condiciones de hidrólisis, como temperatura, pH y tiempo buscando maximizar la eficiencia en la conversión del bagazo en azúcares fermentables, lo que no solo impulsa la producción de etanol para su uso como biocombustible, sino que también abre las puertas a diversas aplicaciones industriales. El etanol, debido a su versatilidad y propiedades químicas, encuentra aplicación en sectores como la industria farmacéutica, alimentaria, cosmética y química.

En la industria farmacéutica, el etanol se utiliza como solvente en la producción de medicamentos y extractos naturales. En la industria alimentaria, es un componente clave en la fabricación de bebidas alcohólicas, vinagres y salsas, entre otros productos. Además, su uso en la industria cosmética se debe a su capacidad para disolver ingredientes activos y suavizar la textura de los productos.

Asimismo, el etanol es una sustancia fundamental en la producción de otros compuestos químicos, como ésteres, éteres y aldehídos, ampliando aún más su campo de aplicación en la industria química [3]. Esta diversidad de usos demuestra la relevancia y significado industrial del etanol, convirtiéndolo en un componente clave en la transición hacia una economía más limpia y sostenible.

En resumen, este proyecto no solo se centra en la producción eficiente de etanol a partir de bagazo residual, sino que también resalta la importancia de este producto en múltiples sectores industriales, demostrando su impacto significativo en la economía circular y la búsqueda de alternativas sostenibles para el desarrollo.

OBJETIVOS

Obtener etanol carburante partiendo del bagazo residual de un proceso de fermentación alcohólica en escala piloto

Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente el bagazo residual de un proceso de fermentación alcohólica.
- Establecer las condiciones de operación del biorreactor para la hidrólisis del bagazo residual de un proceso de fermentación alcohólica
- Desarrollar la fermentación de los carbohidratos reductores para la obtención de Etanol.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Etanol

El etanol o alcohol etílico es un compuesto químico perteneciente a la familia de los alcoholes. Se caracteriza por su capacidad de disolverse en agua y en muchos otros solventes orgánicos, lo que lo convierte en una sustancia versátil con una amplia gama de aplicaciones. Una de las características más destacadas del etanol es su uso como combustible. Es un componente principal de la gasolina en muchas partes del mundo y también se utiliza como biocombustible en forma de etanol de maíz, caña de azúcar u otros cultivos ricos en azúcares. Además de su uso como combustible, el etanol tiene aplicaciones en la industria alimentaria como aditivo en bebidas alcohólicas, como conservante y como materia prima para la producción de vinagre y otros productos. En el ámbito farmacéutico, el etanol se emplea como disolvente en la fabricación de medicamentos, extractos herbales y productos de cuidado personal. Es importante mencionar que el etanol tiene propiedades desinfectantes y se utiliza como desinfectante en productos de limpieza y en la desinfección de superficies en entornos médicos y de laboratorio [4].

1.1.1. *Propiedades Fisicoquímicas*

El etanol es un líquido transparente, incoloro e inflamable, con olor etéreo, sabor acre, es miscible totalmente con agua y su fórmula química es C_2H_6O . Algunas de las propiedades fisicoquímicas de este compuesto son:

- Grado alcoholimétrico: 95°
- pH : Neutro
- Punto de inflamación: 14°C
- Punto de ebullición: 78,3°C
- Punto de fusión: -114°C

- Temperatura de auto ignición: 365°C
- Límite de explosión (inferior/superior): 3,3 / 19 v/v%
- Presión de vapor (20°C): 59,2 mbar
- Densidad (20°C): 789 kg/m³

[3].

1.2. Bioetanol

Es un tipo de etanol que se obtiene exclusivamente a partir de fuentes de biomasa vegetal, como mieles y jugos ricos en sacarosa de fábricas azucareras, productos con alto contenido de almidón, y materiales lignocelulósicos. A diferencia del etanol obtenido por vía petroquímica o a partir de gas natural, el bioetanol se deriva de materias primas renovables y sostenibles. Su producción de bioetanol se basa en la fermentación de azúcares, hidratos de carbono fermentables, almidón, celulosa o hemicelulosas presentes en diversos materiales vegetales. Estos materiales se clasifican en tres grupos principales: azucarados (como las mieles y jugos de caña de azúcar), amiláceos (cereales y tubérculos) y lignocelulósicos (maderas y plantas anuales).

El proceso de obtención de bioetanol implica la transformación de los azúcares o almidones presentes en la biomasa vegetal en etanol mediante la acción de microorganismos fermentadores, principalmente levaduras como la *Saccharomyces Cerevisiae* [5].

1.3. Determinación De Grado Alcohólico

La medición del contenido alcohólico en líquidos es fundamental en diversas industrias, incluyendo la producción de bebidas alcohólicas y la investigación científica. Determinar el grado de alcohol garantiza el cumplimiento de normativas y estándares de calidad, además de proporcionar información esencial para el control del proceso de producción y la caracterización del producto final. Hay varios métodos para medir el contenido de alcohol, cada uno con ventajas y limitaciones específicas, variando en complejidad, precisión y

aplicabilidad.

1.3.1. Densímetro (Hidrómetro)

Un hidrómetro o densímetro es un instrumento de medición utilizado para determinar la densidad de líquidos. Funciona mediante el principio de Arquímedes, donde el hidrómetro flota en el líquido y la profundidad a la que se hunde indica la densidad del mismo. Este dispositivo se utiliza en diversas aplicaciones, incluyendo la industria alimentaria y de bebidas, donde se emplea para medir el contenido de alcohol en soluciones, como en la elaboración de vinos y cervezas [6]. El hidrómetro está diseñado con una escala graduada que permite leer directamente la densidad o gravedad específica del líquido. Existen versiones digitales que ofrecen mayor precisión y facilitan la gestión de datos. La temperatura del líquido también es un factor importante, ya que la densidad puede variar con cambios de temperatura, lo que puede afectar la precisión de la medición [7].

Figura 1.

Densímetro.



Nota. En la imagen se muestra un densímetro. Tomado de: Prost, "Densímetro de triple escala," [en línea]. Disponible en. <https://www.prost.cl/product/densimetro-de-triple-escala>

1.3.2. Alcoholímetro Gay – Lussac

El alcoholímetro Gay-Lussac es un instrumento que mide la concentración de alcohol en líquidos, especialmente en bebidas destiladas, utilizando el principio de flotabilidad. Este dispositivo, expresa los resultados en grados Gay-Lussac o en porcentaje de volumen (% ABV), se sumerge en el líquido y la profundidad a la que flota indica la cantidad de alcohol presente. Normalmente, estos alcoholímetros están calibrados a 20 °C, lo que es esencial para obtener lecturas óptimas, ya que la densidad del líquido puede cambiar con la temperatura. Son comúnmente utilizados en la industria de bebidas alcohólicas para asegurar que los productos cumplan con las regulaciones de contenido alcohólico. Además, suelen tener escalas que permiten una lectura directa del porcentaje de alcohol, y algunos modelos avanzados incluyen termómetros para medir la temperatura del líquido, facilitando la corrección de las lecturas según la temperatura del destilado [8].

Figura 2.

Alcoholímetro Gay – Lussac.



Nota. Esta imagen muestra un alcoholímetro Gay-Lussac, utilizado para medir el contenido de alcohol en líquidos. Su escala indica el porcentaje de alcohol en volumen. Tomado de: "Alcoholímetro según Gay-Lussac + Cartier, doble escala", Labexco , [En línea]. Disponible en. <https://labexco.com/product/alcoholimetro-segun-gay-lussac-cartier-dob/> .

1.3.3. Azeótropo Etanol – Agua

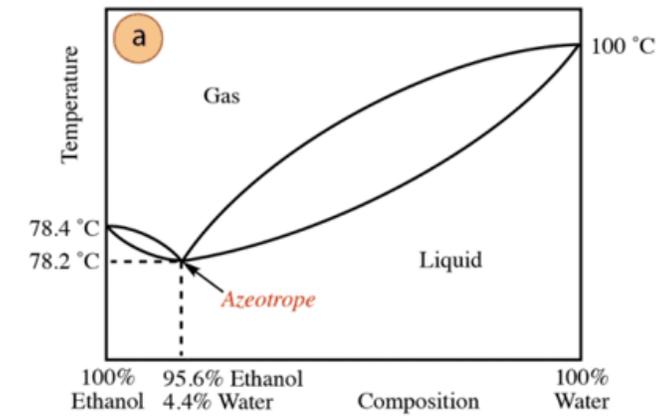
Un azeótropo es una mezcla líquida de dos o más compuestos químicos que tiene una composición definida y una temperatura de ebullición constante. En este tipo de mezcla, la composición del líquido y del vapor en equilibrio es la misma, lo que significa que no se puede separar mediante destilación simple. Además, el azeótropo puede tener una temperatura de ebullición superior, inferior o igual a la de los componentes individuales de la mezcla [9].

El azeótropo formado por etanol y agua tiene una composición de aproximadamente 95,6 % de etanol y 4,4 % de agua, con un punto de ebullición de 78,2 °C a 1 atmósfera [10]. Comparado con los puntos de ebullición de los componentes puros, donde el punto de ebullición del etanol es 78,3 °C y el del agua es 100°C, se evidencia que el punto de ebullición de la mezcla es inferior al de ambos componentes, lo que se traduce en que las fuerzas moleculares en la mezcla son más débiles que en los componentes individuales. La temperatura de ebullición mínima de la mezcla la clasifica como un azeótropo positivo, mostrando una desviación positiva de la ley de Raoult [11].

Para obtener un compuesto más puro a partir de este azeótropo, no es suficiente una destilación simple como se mencionó anteriormente, ya que esta no puede separar de forma eficaz los componentes de la mezcla. Se requieren métodos más complejos, como la destilación azeotrópica o una destilación extractiva para lograr la separación deseada y obtener etanol y agua en sus formas más puras [10].

Figura 3.

Diagrama de temperatura vs composición de la mezcla etanol – agua.



Nota. Este diagrama muestra la relación entre la temperatura de ebullición y la composición de la mezcla de etanol y agua. El punto azeotrópico, ubicado en 95.6% de etanol y 4.4% de agua, tiene un punto de ebullición constante de 78.2°C. Tomado de. CR Barbisan, "Definición de Azeótropos", Significado.com , abril 2022. [En línea]. Disponible en. <https://significado.com/azeotropos/> .

1.3.4. Aplicaciones Del Etanol

El etanol es un compuesto químico que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones en diversas industrias. Su capacidad para actuar como solvente, desinfectante y conservante lo convierte en un ingrediente indispensable en muchos productos y procesos. A continuación, se detallan algunas de las principales aplicaciones del etanol con una pureza del 96%, destacando su importancia en áreas como la medicina, la industria química, la conservación biológica, la cosmética, la energía y la producción de materiales.

1.3.4.a Desinfectante Y Antiséptico. El etanol se usa extensamente como desinfectante y antiséptico en entornos médicos y de cuidado personal. Su eficacia para eliminar bacterias, virus y hongos lo convierte en un componente esencial en productos como desinfectantes para manos y soluciones antisépticas. Al aplicarse sobre la piel, desnaturaliza las proteínas de los microorganismos, ayudando a prevenir infecciones. En hospitales y clínicas, es

crucial para mantener la higiene y la seguridad, especialmente en procedimientos quirúrgicos y en la limpieza de superficies [12].

1.3.4.b. Solvente En La Industria Química. En la industria química, el etanol actúa como un solvente eficaz para disolver una amplia gama de compuestos. Se utiliza en la formulación de productos farmacéuticos, plásticos, lacas y perfumes. Su capacidad para mezclar con diferentes sustancias lo hace indispensable en procesos de síntesis química y en la producción de productos que requieren una alta solubilidad. Además, su volatilidad permite que se evapore rápidamente, lo que es beneficioso en aplicaciones donde se requiere un secado rápido [13].

1.3.4.c. Conservación De Especímenes. El etanol se utiliza en laboratorios y centros de investigación para la preservación de especímenes biológicos. Su capacidad para deshidratar y desnaturalizar proteínas ayuda a mantener la integridad de las muestras, lo que es fundamental para estudios histológicos y patológicos. En el ámbito de la biología y la medicina forense, el etanol es un agente de conservación que permite la recolección y almacenamiento de tejidos y fluidos biológicos sin degradación [14].

1.3.4.d. Base Para Perfumes Y Cosméticos. En la industria cosmética, el etanol es un ingrediente fundamental en la fabricación de perfumes, colonias y productos de cuidado personal. Actúa como un solvente eficiente que disuelve fragancias y otros ingredientes activos, mejorando la estabilidad y la aplicación de estos productos en la piel. Su rápida evaporación contribuye a una sensación de frescura inmediata tras la aplicación, lo que es muy apreciado en productos como perfumes y colonias. Además, sus propiedades antimicrobianas lo hacen ideal para su inclusión en desodorantes y productos para el cuidado de la piel, ayudando a mantener la higiene y prolongar la vida útil de los productos. La capacidad del etanol para mezclar diferentes componentes de manera uniforme garantiza la consistencia y calidad de los productos cosméticos, haciéndolos más efectivos y agradables para el usuario [15].

1.3.4.e. Usos Energéticos. Aunque el etanol utilizado como combustible para vehículos

debe ser anhidro (libre de agua), el etanol al 96% se emplea en diversas aplicaciones energéticas. Se utiliza como combustible en estufas de camping y en otras aplicaciones donde se requiere una fuente de energía portátil y limpia. Su capacidad para quemarse de manera eficiente lo convierte en una opción viable para estos usos específicos, proporcionando una fuente de energía confiable y accesible [16].

1.3.4.f. Producción De Productos Químicos. El etanol al 96% también se utiliza como materia prima en la producción de diversos productos químicos, incluyendo acetaldehído y butadieno. Estos compuestos son esenciales en la fabricación de plásticos, cauchos y otros materiales industriales, desempeñando un papel crucial en la cadena de suministro de la industria química [17].

1.4. Caracterización Físicoquímica

La caracterización físicoquímica de un material es crucial para entender sus propiedades y comportamiento en diversas aplicaciones. En este contexto, dos parámetros importantes son el contenido de humedad y el contenido de cenizas. El contenido de humedad mide la cantidad de agua en una muestra, lo que puede afectar su estabilidad, textura y vida útil. Por otro lado, el contenido de cenizas por ignición proporciona información sobre la pureza y composición mineral del material. La determinación precisa de estos parámetros se realiza a través de métodos estandarizados, y los resultados son esenciales para asegurar el cumplimiento de normativas y optimizar procesos en varias industrias, incluyendo la alimentaria, farmacéutica y química. Además, conocer estos parámetros permite mejorar el control de calidad y la eficiencia en la producción, asegurando productos finales de alta calidad [18].

1.4.1. Determinación Del Contenido De Humedad

El contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua presente en una muestra, expresada como un porcentaje del peso total. Este procedimiento permite evaluar la viabilidad de los residuos. Para determinarlo, se pesa la muestra antes y después de

secarla en un horno a 105 °C [18]. La fórmula utilizada para calcular el contenido de humedad es:

Ecuación 1. *Contenido de Humedad.*

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = \left(\frac{PH - PS}{PH} \right) \cdot 100$$

Donde PH corresponde al peso de la muestra húmeda y PS hace referencia al peso de la muestra seca [19].

1.4.2. Determinación Del Contenido De Cenizas

El contenido de cenizas se refiere a la cantidad de materia inorgánica que queda después de la combustión completa de una muestra orgánica, se usa para evaluar la calidad y pureza de los materiales, así como para determinar la composición mineral de una muestra. La determinación de cenizas por ignición es un método analítico en el cual se incineran las muestras a altas temperaturas, generalmente alrededor de 550 °C [20], en un horno mufla, hasta que toda la materia orgánica se quema y solo quedan las cenizas. El contenido de cenizas se determina mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 2. *Contenido de Cenizas.*

$$\text{Contenido de Cenizas (\%)} = \left(\frac{PC}{PM} \right) \cdot 100$$

Donde PC es igual al peso del residuo orgánico y PM corresponde al peso de la muestra antes de la ignición [19].

1.5. Fermentación Alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso biológico que tiene como objetivo proporcionar

energía anaeróbica a los microorganismos unicelulares llamados levaduras, cuando no hay oxígeno disponible, resaltando que estos microorganismos son capaces de vivir en entornos escasos de oxígeno. Durante este proceso, las levaduras descomponen las moléculas de glucosa y obtienen la energía necesaria para su supervivencia, generando alcohol y dióxido de carbono como subproductos de la fermentación. Estos microorganismos están presentes comúnmente en frutas y cereales, siendo los responsables de brindar gran parte del sabor a los productos fermentados, de esta manera se implican en el desarrollo de los sabores y aromas. Teniendo en cuenta lo anterior la fermentación alcohólica tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria de alimentos y bebidas, este proceso clave se utiliza en la producción de bebidas alcohólicas, como el vino, la cerveza, la sidra y el cava [21].

1.5.1. Levaduras

Las levaduras son microorganismos unicelulares presentes de manera natural en frutas, cereales y verduras; su tamaño varía entre 3 y 40 micrómetros. Su capacidad reproductiva varía según la especie y puede ser de aproximadamente 2 a 3 horas en las condiciones de crecimiento adecuadas. Hasta el momento, se han identificado alrededor de 500 especies de levaduras, siendo reconocidas por primera vez por su capacidad de fermentación por Louis Pasteur en 1857. El término "levadura" deriva del latín "levare", que significa "levantar", debido a que producen dióxido de carbono, el cual provoca la expansión de las proteínas del gluten en la harina, resultando en el aumento de volumen de la masa [22]. Las levaduras son capaces de funcionar sin oxígeno y desempeñan un papel importante en la producción de etanol, las especies más comunes son: *Saccharomyces Cerevisiae*, *Khuyveromyces Fragilis*, z y *Zymomonas Mobilis*. El género *Saccharomyces* sp. se destaca por ser el más empleado durante siglos, ya que convierte de forma rápida los azúcares a etanol, esto se debe a la tolerancia al etanol de más de 80g/l, asimismo tolera las variaciones de temperatura y resiste un ambiente ácido, pero cabe aclarar que presenta unas desventajas como altos costos de aireación, elevada producción de biomasa y no tiene la capacidad de metabolizar pentosas que son los componentes fundamentales de la hemicelulosa. En el caso de *Zymomonas Mobilis* se evidencia que posee una notable

resistencia para sobrevivir en concentraciones elevadas de etanol y cumple con las condiciones requisito para un proceso fermentativo, lo que la convierte en una levadura ideal para la producción de etanol con fines no alimentarios, como los biocombustibles [23].

1.6. Biomasa Lignocelulósica

Actualmente se busca utilizar nuevas materias primas apuntando a una economía circular y mejorando la sostenibilidad de cada proceso. Puntualmente, la biomasa lignocelulósica ha sido utilizada en las biorrefinerías de segunda generación debido a su disponibilidad. La biomasa vegetal de origen lignocelulósico se compone principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Este tipo de biomasa incluye residuos del procesamiento de productos agrícolas, residuos de actividades humanas, residuos industriales y otros. No incluye biomasa principalmente compuesta por almidón, proteínas o azúcares, como por ejemplo los granos, cereales, mieles y otros productos similares. La celulosa es el componente principal, se encuentra en una composición entre el 35% y el 50% del peso seco del material, esto varía según el tipo de residuo. La celulosa es un polímero cristalino formado por unidades de glucosa que se unen con enlaces β - 1,4 - O - glucosídicos. Debido a los puentes de hidrógeno, se puede considerar que el polímero está formado por subunidades de celobiosa. Estas cadenas poliméricas se agrupan en estructuras cristalinas llamadas microfibras, formando fibras más grandes [24].

En términos de composición, además de la celulosa, hemicelulosas y lignina, también contiene extractivos, que son una mezcla de diversos compuestos orgánicos, así como algunos componentes inorgánicos que se convierten en cenizas después de la combustión. Estos elementos son la base de numerosas aplicaciones y derivados con alto valor agregado en diversas industrias. Una de las ventajas más destacadas de los materiales lignocelulósicos es su capacidad de biodegradación y su renovabilidad, ya que son el producto de la fotosíntesis de las plantas mediante la energía solar. Esto hace que su uso como combustibles sea una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente al aprovechar la energía solar de forma eficiente [5].

1.7. Cerveza

La cerveza es una bebida alcohólica que se obtiene a partir de la fermentación de cereales, principalmente la cebada que contiene entre un 60% - 65% de almidón. Tradicionalmente, la cerveza se ha aromatizado con diferentes frutas, hierbas aromáticas y especias, a lo largo del tiempo se añadieron ingredientes como el lúpulo y la levadura para añadir amargor y aroma, mejorando también las técnicas de producción [25].

1.7.1. Proceso De *Producción De Cerveza*

A lo largo del tiempo, el proceso de elaboración de la cerveza ha mantenido sus componentes principales: agua y cereal, los cuales se fermentan con la finalidad de convertir los carbohidratos en alcohol mediante levaduras. Para enriquecer el sabor y el aroma distintivo de la cerveza, se han utilizados aditivos como frutas, miel y plantas aromáticas. Al pasar del tiempo se ha establecido el lúpulo como un ingrediente estándar, aunque en algunas regiones se siguen empleando plantas aromáticas tradicionales [26]. Hoy se pueden controlar con precisión las características de las materias primas, cultivar y mezclar levaduras, se evalúan parámetros como la calidad del grano, el grosor de la molienda, y el desarrollo de la germinación. También se controla la temperatura y tiempos asegurando la calidad del producto final. Además se implementan técnicas avanzadas de fermentación y filtración para mejorar la eficiencia del proceso y la estabilidad del producto, permitiendo la producción de cervezas con perfiles sensoriales específicos y consistentes [27].

1.7.1.a. Malteado Y Molienda. Se da inicio mediante la malteación de granos de cebada, la cebada se remoja para empezar la germinación y finalmente se seca para producir malta, la cual se muele para convertirla en una harina fina o “grist fino”, para facilitar de esta manera la extracción de azúcares durante la maceración. Este proceso no solo permite obtener los azúcares fermentables, sino que, además, influye en el perfil de sabor y color de la cerveza final [27].

1.7.1.b. Maceración Y Lavado. El grist fino se mezcla con agua caliente disolviendo aproximadamente el 75% de su contenido en un proceso llamado maceración. Las enzimas presentes en la malta descomponen el almidón en azúcares fermentables como la maltosa y la glucosa, donde se produce el mosto. Mediante lavado se filtra el mosto, separando los sólidos insolubles de la malta y el líquido rico en azúcares y nutrientes para la levadura [27].

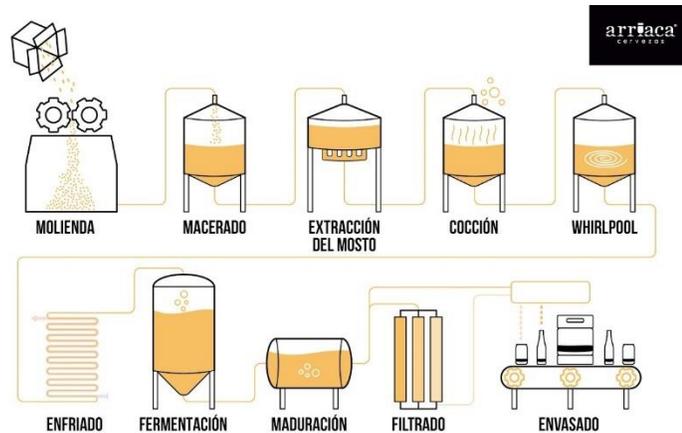
1.7.1.c. Adición De Lúpulo. El mosto se expone a un proceso de cocción donde se añade lúpulo para proporcionar amargor, sabor y aroma a la cerveza contribuyendo así al perfil sensorial de la cerveza y adicionalmente actuando como agente conservante y estabilizador. Esta etapa es fundamental ya que se esteriliza el mosto, eliminando organismos no deseados [27].

1.7.1.d. Fermentación. Después de la cocción del mosto, se disminuye la temperatura rápidamente para detener reacciones y prevenir contaminaciones, posteriormente se transfiere al fermentador, donde se agrega la levadura. Este proceso es el que permite a los azúcares presentes convertirse en alcohol y dióxido de carbono [27].

1.7.1.e. Clarificación Y Maduración. Una vez termina la etapa de fermentación, la cerveza se clarifica mediante procesos como centrifugación, filtración o el uso de agentes clarificantes, con la finalidad de eliminar sedimentos y/o partículas en suspensión para posteriormente someterse a un proceso de maduración donde se produce una fermentación secundaria y se desarrollan los sabores y aromas finales [27].

Figura 4.

Proceso de fabricación de cerveza.



Nota. Figura del proceso de fabricación de cerveza. Tomado de: Cervezas Arriaca. “Proceso de elaboración”. [En línea]. Disponible en. https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=RK6jY_1XNWc

1.7.2. Bagazo De Cerveza

Las cervecerías generan varios residuos durante la producción de cerveza, como el bagazo de cebada, la tierra infusoria gastada y la crema de levadura, entre otros. Uno de estos residuos es el bagazo o afrecho, es obtenido como subproducto del proceso de prensado y filtración del mosto obtenido de la malta de cebada [28].

Es importante destacar el potencial del afrecho como biomasa para la producción de biogás, lo que podría contribuir significativamente a la reducción del consumo de combustible en las cervecerías. Su composición química varía en función de su contenido de materia seca que se encuentra en un rango del 20 – 25%, es un subproducto rico en proteínas con un contenido medio de 24 – 26% sobre materia seca, también es rico en fibra con un contenido del 53% de Fibra Neutro Detergente (FND) y un 27% de Fibra Ácido Detergente (FAD) teniendo en cuenta que su porcentaje de fibra efectiva es del 18%. Contiene 4% de lignina, 4% de cenizas y 8% de extracto etéreo (indicador de la cantidad

de compuestos lipídicos que contribuyen al valor energético y nutricional). Su energía metabolizable es de $2,86 \frac{Mcal}{Kg}$. El afrecho se degrada con una velocidad de $\frac{7\%}{h}$ y la degradabilidad efectiva es del 50% [29].

Además de su uso como alimento para ganado vacuno y porcino, el afrecho también ha despertado un interés creciente en su aplicación para la producción de etanol. Mediante procesos de fermentación y destilación, el afrecho puede ser convertido en etanol, un biocombustible renovable y sostenible. Esta innovación no solo beneficia a las cervecerías al reducir sus costos de energía y gestionar de manera más eficiente sus residuos, sino que también contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles en el sector industrial y a la generación de fuentes de energía más limpias y amigables con el medio ambiente [28].

1.8. Producción De Etanol

La producción de etanol es un proceso que consta de varias etapas esenciales para obtener un producto final de calidad. Estas etapas están perfectamente definidas y se llevan a cabo de manera secuencial para garantizar la eficiencia y la calidad del etanol producido.

La primera etapa es la realización de reacciones bioquímicas. Estas reacciones son el resultado del metabolismo de los microorganismos utilizados específicamente para este propósito. Estos microorganismos transforman los azúcares fermentables presentes en la materia prima en alcohol etílico, que es el producto principal deseado. La segunda etapa del proceso implica la separación del producto deseado, es decir, el etanol, del resto de los compuestos presentes en el mosto fermentado. Esta separación y concentración del etanol son fundamentales para reducir su volumen y facilitar su manejo posterior. El método más comúnmente utilizado para esta separación es la destilación, que aprovecha las diferentes temperaturas de ebullición y condensación de los componentes para separar el etanol de otros compuestos presentes en la mezcla. Además de la destilación, pueden emplearse otras operaciones unitarias como la extracción y la adsorción para mejorar la pureza y calidad del etanol obtenido. Finalmente, la tercera etapa del proceso de producción de

etanol se centra en el tratamiento, disposición y aprovechamiento de los subproductos separados durante la destilación. Esta etapa ha adquirido una importancia creciente en tiempos recientes debido a la necesidad de aprovechar de manera eficiente todos los recursos y de garantizar la protección del medio ambiente. Las estrategias de tratamiento y aprovechamiento de los subproductos pueden incluir su utilización como materias primas en otros procesos industriales, su conversión en productos de valor añadido o su disposición de manera ambientalmente responsable para minimizar los impactos ambientales negativos. [4]

En conjunto, estas tres etapas del proceso industrial de producción de etanol son fundamentales para garantizar la obtención de un producto final de alta calidad, maximizando la eficiencia en el uso de recursos y minimizando los impactos ambientales asociados con la producción de este biocombustible. [4]

1.8.1. Pretratamiento De La Biomasa

Este proceso consiste en preparar la materia prima después de recibirla, adaptándola para una óptima conversión en etanol. Para materiales con alto contenido de azúcares, como las mieles y melazas del afrecho de malta, se aplican tecnologías como la extracción y clarificación del jugo, o simplemente la dilución, ya que los azúcares fermentables están directamente disponibles sin necesidad de hidrólisis adicional. Sin embargo, para materiales ricos en almidón como el maíz, se requiere una molienda en seco para obtener un tamaño adecuado antes de la hidrólisis. En el caso del afrecho de malta, un pretratamiento común es el secado en horno para reducir la humedad y mejorar la eficiencia de la molienda posterior. El acondicionamiento de la biomasa lignocelulósica, como el afrecho de malta, implica un fraccionamiento y tratamiento específico. Esto puede incluir el uso de ácido diluido, explosión a vapor o amonólisis para facilitar el acceso de las enzimas a la celulosa presente en el afrecho. Estos tratamientos son clave para maximizar la eficiencia de la hidrólisis enzimática y la posterior fermentación para la obtención de etanol [30].

1.8.2. Hidrólisis Ácida

La hidrólisis ácida de materiales lignocelulósicos se puede realizar de dos formas principales: utilizando ácido concentrado o ácido diluido, cada uno con sus propias características y condiciones de proceso. El ácido concentrado, generalmente ácido sulfúrico, ofrece altos rendimientos a temperaturas bajas y bajo consumo de energía, con concentraciones entre 30-72% y temperaturas entre 40°C y 70°C. Sin embargo, este método requiere reactores resistentes a la corrosión y aumenta los costos debido a la agresividad del ácido. Por otro lado, el ácido diluido, como ácido clorhídrico, tiene un gran potencial industrial y se realiza a temperaturas más altas, con concentraciones entre 0,3% y 2% y temperaturas entre 120°C y 220°C. Aunque requiere más energía, permite una mayor eficiencia en la hidrólisis y es menos corrosivo, lo que reduce los costos de mantenimiento [31].

Este proceso descompone los polímeros de celulosa y hemicelulosa en azúcares simples, que luego pueden ser fermentados por microorganismos para la obtención de etanol. Sin embargo, se deben considerar aspectos como el manejo adecuado de los residuos ácidos y la optimización de las condiciones de proceso para maximizar la eficiencia y sostenibilidad de la producción de biocombustibles, la implementación de controles precisos en el proceso de hidrólisis, y la integración de las técnicas avanzadas para minimizar la generación de subproductos indeseables [32].

1.8.3. Espectrofotometría

La espectrofotometría UV – visible, es una técnica analítica por medio de la cual se determina la concentración de un compuesto en solución a través de la medición de la cantidad de luz absorbida. Este proceso se lleva a cabo utilizando un espectrofotómetro, que permite seleccionar la longitud de onda de la luz y medir la absorbancia de la muestra. La absorción de radiaciones electromagnéticas por las moléculas está relacionada con su capacidad para absorber energía luminosa y almacenarla en forma de energía interna. Esto resulta fundamental en procesos biológicos como la fotosíntesis. Cada molécula presenta

una serie de estados excitados que la distinguen, generando un espectro de absorción característico que sirve como señal de identidad [33].

La ley de Lambert-Beer establece una relación entre la absorbancia de luz y la concentración del cromóforo en solución, proporcionando un método para determinar cuantitativamente la concentración de una sustancia. La espectrofotometría UV-visible es una herramienta clave en bioquímica y ciencias afines, permitiendo la identificación, cuantificación y caracterización de biomoléculas en solución a través de la medición de la absorbancia de la luz a diferentes longitudes de onda [32].

1.8.3.a. Método DNS De Miller. El método DNS (Miller, 1959) es una técnica colorimétrica utilizada para la determinación de azúcares reductores en muestras biológicas. Se basa en una reacción redox entre el 3,5 – dinitrosalicílico (DNS) y los azúcares reductores presentes en la muestra, que resulta en la formación de ácido 3 – amino – 5 – nitrosalicílico, con un cambio de color de amarillo a rojo ladrillo. Esta reacción se detecta espectrofotométricamente a una longitud de onda de 540 nm [33].

El método DNS es efectivo para cuantificar azúcares reductores como glucosa y xilosa, entre otros, en medios líquidos y sólidos utilizados en cultivos biológicos. La coloración final generada es estable por al menos 24 horas, lo que permite la manipulación de un gran número de muestras de manera sensible y adaptable. Esta técnica es ampliamente utilizada en laboratorios bioquímicos y microbiológicos para estudiar la fermentación de azúcares y evaluar la actividad enzimática relacionada con la utilización de estos sustratos [34].

Para determinar la concentración de azúcares reductores totales en una muestra se realiza mediante la construcción de una curva de calibración absorbancia-concentración. Para ello, se preparan soluciones estándar de glucosa en concentraciones conocidas (200-1000 mg/L) y se les aplica el método DNS, midiendo la absorbancia de cada solución a 540 nm en un espectrofotómetro. Con estos datos se construye la curva de calibración, que luego se utiliza para determinar la concentración de azúcares reductores en las muestras [34].

En el procedimiento del método DNS, se mezclan 0,5 mL de muestra con 0,5 mL de reactivo DNS y se lleva la mezcla a ebullición durante 5 minutos en un baño de maría. Posteriormente, se detiene la reacción con un baño de agua y hielo y se diluyen las muestras con 5 mL de agua destilada. Tras agitar y dejar reposar las muestras por 15 minutos, se mide la absorbancia a 540 nm. Se realiza un tratamiento similar para el blanco con agua destilada como control. La concentración de azúcares reductores en las muestras se determina mediante la lectura de la absorbancia en la curva de calibración previamente construida. Este método es útil para cuantificar la cantidad de azúcares reductores presentes en diversas muestras, lo que resulta importante en estudios de fermentación y análisis de sustratos en procesos biológicos [35].

1.8.4. Glucólisis

La glucólisis es un proceso metabólico fundamental que ocurre en la mayoría de los organismos vivos, donde la glucosa se descompone en dos moléculas de tres carbonos llamadas piruvato, generando energía en el proceso. Esta vía metabólica ancestral se encuentra en casi todos los seres vivos, tanto aerobios como anaerobios [35].

Durante la glucólisis, la glucosa experimenta una serie de reacciones enzimáticas en el citosol celular. En la primera fase, que requiere energía, la glucosa se convierte en fructosa-1,6-bisfosfato mediante el consumo de dos moléculas de ATP. Luego, la fructosa-1,6-bisfosfato se divide en dos moléculas de tres carbonos, generando gliceraldehído-3-fosfato y dihidroxiacetona fosfato (DHAP). El DHAP se convierte en gliceraldehído-3-fosfato, y ambas moléculas de tres carbonos pasan a la fase de producción de energía. En la fase de producción de energía, cada gliceraldehído-3-fosfato se convierte en piruvato, generando una molécula de NADH y dos de ATP por cada molécula de glucosa. Este proceso se repite dos veces, ya que la glucosa se divide en dos moléculas de tres carbonos en etapas previas. La regulación de la glucólisis es crucial para el equilibrio energético de la célula. La enzima fosfofructocinasa desempeña un papel clave al catalizar una reacción determinante en la vía. Esta enzima puede acelerar o frenar la glucólisis según las necesidades energéticas de la célula, regulando así la producción de ATP. La glucólisis es

un proceso bioquímico fundamental que proporciona energía a las células mediante la descomposición de la glucosa, y es esencial tanto en organismos aerobios como anaerobios para la generación de ATP [35].

1.8.5. Fermentación

La fermentación es un proceso biológico fundamental en la producción de etanol a partir de diversas fuentes de biomasa. En esta transformación, microorganismos como las levaduras descomponen los azúcares presentes en la biomasa para generar etanol y otros subproductos.

1.8.5.a. Fermentación Por Tandas. Es una técnica discontinua en la cual se carga un volumen definido de solución de melaza, junto con nutrientes y levadura, en un fermentador. Después de agotar el azúcar y alcanzar la concentración máxima de etanol, se finaliza la tanda y se procede a la destilación. Además, se menciona la opción de utilizar levadura comercial para evitar riesgos de contaminación y simplificar el proceso de reproducción/propagación de la levadura [36].

1.8.5.b. Fermentación Por Tandas Con Reuso De Levadura. En este proceso de fermentación, se utiliza una fracción de levadura tratada como inóculo para cada lote sucesivo, lo que reduce la necesidad de azúcar y aumenta el rendimiento de la fermentación de etanol. El sobrenadante del lote anterior se destila. Sin embargo, esta variante de fermentación se ha dejado de utilizar en Guatemala debido a los mayores requerimientos de energía, insumos y control, sin generar ganancias significativas [36].

1.8.5.c. Fermentación Continua. En este tipo de fermentación se alimenta constantemente una solución de melaza al reactor y se retira un flujo continuo de mosto fermentado. Se mantiene un equilibrio constante de concentraciones de masa celular, etanol y azúcares dentro del reactor. Para garantizar la viabilidad de la levadura, el mosto en equilibrio se dirige a una segunda etapa de agotamiento de azúcares y máxima producción de etanol antes de pasar a la destilación. Este proceso requiere un control riguroso y presenta un

mayor riesgo de contaminación bacteriana. Aunque es un proceso continuo, es necesario mantener un equilibrio y ajustar adecuadamente los volúmenes de los reactores para cada etapa. Es crucial ajustar adecuadamente los tiempos de cada etapa [36].

1.8.5.d. Fermentación Continua Con Prefermentación Continua .En este tipo de fermentación se aprovecha al máximo la cinética de la fermentación alcohólica. Se utiliza un pre-fermentador para desarrollar la fase logarítmica de crecimiento y producción de etanol, mientras se alimenta continuamente con solución de melaza o miel. Una parte del cultivo se transfiere al fermentador final y el resto se mantiene como inóculo para el siguiente ciclo. Este enfoque permite mantener un desarrollo óptimo de la fermentación y acortar el ciclo total de fermentación [36].

1.8.6. Destilación

Durante la destilación, se separan y purifican los componentes de la mezcla fermentada, principalmente el etanol, mediante la evaporación y condensación controlada. Este proceso permite obtener un etanol de alta pureza, apto para su uso en aplicaciones industriales y como biocombustible, contribuyendo así a la generación de una fuente de energía renovable y sostenible. La destilación puede darse en 3 etapas:

- Etanol crudo 45%
- Rectificación a 96%
- Deshidratación a 99,9%

[5]

1.8.6.a. Destilación De Mosto Fermentado. En el proceso de destilación del mosto fermentado, se separa el etanol y otros compuestos volátiles utilizando la volatilidad relativa de los componentes. El mosto, con un contenido alcohólico de 8 a 11%, se somete a destilación, donde se aprovecha el vapor residual del ingenio como fuente de calor para facilitar la separación eficiente de los componentes deseados [36].

1.8.6.b. Destilación Azeotrópica. La destilación azeotrópica se utiliza para concentrar el

alcohol al 95.5%. El término “azeótropo” se refiere a dos líquidos que se vaporizan juntos debido a que tienen el mismo punto de ebullición a una concentración específica. El agua restante, aproximadamente el 4.5%, se elimina mediante procesos de deshidratación, como la adsorción en tamiz molecular. El residuo de la destilación, llamado vinaza, se trata para su disposición y devolución de nutrientes al campo. La configuración de las columnas en la destilación varía según el producto y la calidad deseada [36].

1.8.6.c. Destilación Barbet. La destilación Barbet consta de tres columnas. En la primera columna, se separan los componentes no deseados como vapor, mientras que el líquido restante se dirige a la segunda columna. En la segunda columna, se evaporan los compuestos más volátiles, como metanol y aldehídos, dejando una mezcla de etanol, agua y alcoholes pesados. Esta mezcla se lleva a la tercera columna, donde se extraen el agua y los alcoholes pesados, y el destilado final consiste en etanol con compuestos congénicos remanentes [36].

1.8.6.d. Destilación Extractiva. La destilación extractiva es un método de separación que se aplica para deshidratar mezclas líquidas, como etanol y agua, mediante la incorporación de un solvente que altera las volatilidades relativas de los componentes. Este proceso utiliza solventes como glicoles, menos volátiles y permanecen en la fase líquida, facilitando la separación del componente deseado (por ejemplo, etanol) en forma de vapor. La destilación extractiva es preferida en la industria por su bajo consumo energético y costos operativos competitivos, logrando obtener composiciones superiores al 97% bajo condiciones óptimas de operación [37].

1.9. Reactor CSTR

Un reactor CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) es un dispositivo utilizado en la industria química y de procesos para llevar a cabo reacciones químicas de manera continua y controlada, garantizando condiciones óptimas de operación y eficiencia en la producción de productos químicos. Este tipo de reactor se caracteriza por tener una mezcla homogénea en todo su volumen y por mantener condiciones de operación estables.

Consiste en un tanque con agitación continua que permite el ingreso de reactivos y la extracción de productos de manera constante. La agitación asegura una dispersión homogénea de los reactivos, contribuyendo a una mayor eficiencia de reacción [38].

Este tipo de reactor es especialmente adecuado para reacciones que requieren un tiempo de reacción constante y para procesos donde es necesario mantener condiciones de temperatura, presión y concentración constantes a lo largo del tiempo. El diseño del reactor permite un ajuste preciso de estos parámetros, lo que es crucial para obtener productos con alta calidad, reproducibilidad y eficiencia en la producción. Además, el control adecuado de la velocidad de agitación, la temperatura, el flujo de entrada y salida de reactivos y productos, junto con una adecuada regulación de las condiciones del reactor son aspectos clave en la operación exitosa de un reactor CSTR [38].

1.10. Controlador De Temperatura De Microcomputadora

Es un dispositivo que utiliza un microcomputador para controlar la temperatura de un sistema o entorno, utilizando la potencia de los microprocesadores para monitorear y ajustar la temperatura de manera precisa y efectiva, ofreciendo así un control automatizado.

Su funcionamiento se basa en un sensor de temperatura que mide continuamente la temperatura del ambiente o del objeto que se desea controlar, seguidamente transmite esta información al microcontrolador y hace una comparación con la temperatura establecida inicialmente por el usuario, si la temperatura difiere, el microcomputador envía una señal a un relé, actuando como un interruptor que se activa o desactiva mediante una corriente eléctrica, para ajustar la temperatura a la establecida [39].

Figura 5.

Características de un controlador de temperatura de microcomputadora.



Nota. Controlador de temperatura de microcomputadora y sus principales características de funcionamiento. Tomado de: Twins Chip. Controlador de temperatura de microordenador digital. Disponible en. https://www.twinschip.com/Digital_Microcomputer_Temperature_Controller

1.11. Rotaevaporador

Un rotaevaporador, también conocido como destilador por rotación, es un equipo diseñado para eliminar solventes de manera eficaz de una solución a través de un proceso de destilación a presión reducida. Este método permite separar sustancias sin la necesidad de aplicar calor excesivo, lo que permite obtener productos más puros y es especialmente importante para evitar la degradación de compuestos sensibles al calor [40].

La destilación a presión reducida se basa en la reducción de la presión dentro del sistema, lo que disminuye el punto de ebullición del solvente y facilita su evaporación a temperaturas más bajas que las normales. Esto es posible gracias a la combinación de vacío generado por una bomba de vacío y el calentamiento controlado del matraz donde se encuentra la solución [40].

El rotaevaporador consta de varios componentes clave, incluyendo un matraz que contiene

la muestra líquida a evaporar, un sistema de vacío que reduce la presión dentro del matraz, un baño termostático que controla la temperatura del matraz para evitar sobrecalentamientos, y un rotor que gira lentamente para aumentar la superficie de evaporación y acelerar el proceso de destilación [40].

2. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En este capítulo, se describirá la metodología desarrollada durante el proyecto, detallando cada paso del procedimiento utilizado; como la preparación de reactivos y muestras, las condiciones de reacción, y los métodos de análisis empleados, permitiendo entender tanto la ejecución del trabajo, como la interpretación de los resultados mediante discusión.

La malta utilizada en este proyecto proviene de la cervecería artesanal Merak, ubicada en Bogotá, Colombia. Esta cervecería se dedica a la producción de cerveza artesanal y tiene una capacidad de producción anual de 6000 litros. Para fabricar 20 litros de cerveza, se requieren aproximadamente 4 kilogramos de malta. A partir del proceso de maceración, específicamente en la etapa de filtrado, se obtiene el bagazo de malta hidratado, que puede alcanzar un peso total de 6.5 kilogramos. Así, Merak genera anualmente alrededor de 1950 kilogramos de afrecho o bagazo de malta, material que resulta fundamental para el presente estudio.

2.1. Pretratamiento De La Biomasa

El pretratamiento de la biomasa es una etapa fundamental para garantizar la eficiencia de cada etapa del proceso. Basado en la metodología descrita por Silva Vargas y Soler Londoño [42], el afrecho de malta se sometió a secado en un horno a 70°C durante 5 días. Este paso es crucial para reducir su contenido de humedad, previniendo la descomposición durante el almacenamiento y facilitando su manejo. El afrecho se dispuso en bandejas hechas de aluminio y se secó en el horno a la temperatura establecida. Este procedimiento no solo reduce la humedad del afrecho, sino que también incrementa la concentración de componentes sólidos, facilitando una mayor eficiencia en las etapas de hidrólisis ácida y fermentación. Al disminuir la humedad, se evita el crecimiento de microorganismos no deseados y se estabiliza el afrecho para su manejo y almacenamiento. Además, el secado mejora la accesibilidad de las enzimas y ácidos durante la hidrólisis, ya que el material se vuelve más poroso, permitiendo una mejor penetración de los reactivos. Este tratamiento preliminar es fundamental para maximizar la liberación de azúcares reductores, esenciales

para la fermentación en la producción de etanol. Por lo tanto, el pretratamiento del afrecho de malta no solo mejora la estabilidad y manejabilidad de la biomasa, sino que también optimiza la eficiencia y rendimiento de los procesos químicos y biológicos que siguen.

Figura 6.

Secado de afrecho de malta.



Nota. Afrecho de malta en proceso de secado a 70°C, previo a la hidrólisis ácida para la obtención de etanol.

2.2. Caracterización Físicoquímica Del Afrecho De Malta

El bagazo de malta, fue sometido a una caracterización física, abordando puntualmente aspectos como su contenido de cenizas y humedad. Este enfoque, es esencial para comprender las propiedades físicas del bagazo. La medición del porcentaje de cenizas proporciona información sobre la presencia de materia inorgánica, por otra parte, el porcentaje de humedad es fundamental para definir condiciones óptimas de almacenamiento y manipulación. A continuación, se muestran los 2 métodos empleados y los resultados obtenidos en estas mediciones teniendo en cuenta que se utilizó una sola muestra de Bagazo de Malta de la empresa Merak del proceso de producción de cerveza del día 7 de Junio del 2024 a las 10:00 am.

2.2.1. *Determinación De Humedad*

Para determinar el contenido de humedad del afrecho de malta, inicialmente, se seleccionaron 3 cápsulas que se lavaron cuidadosamente y se colocaron en un horno secador a 100 °C durante 2 horas, con la finalidad de eliminar cualquier humedad residual. Posteriormente, las cápsulas se enfriaron en un desecador durante 20 minutos y se pesaron en una balanza de precisión. En cada una de estas capsulas se añadieron 5 g de afrecho de malta y se colocaron nuevamente en el horno, pero esta vez a una temperatura de 110 °C durante 3 horas, seguidamente se llevaron al desecador durante 30 minutos y se pesaron nuevamente. La diferencia en peso antes y después del secado, permitió calcular el contenido de humedad del afrecho.

Figura 7.

Determinación de humedad de afrecho de malta



Nota. La imagen muestra tres capsulas que contienen 5 g de afrecho de malta en secado a 110°C durante 3 horas, como parte del análisis para determinar el contenido de humedad.

Para determinar el contenido de humedad presente en el afrecho de malta, se empleó la ecuación 1, detallada anteriormente en la sección 2.2.1 del presente documento. Esta ecuación, fundamental para el análisis, se aplicó a las tres diferentes muestras como se muestra en la Figura 8. Los valores correspondientes al porcentaje de humedad resultante de cada experimento se resumen en la tabla 1, donde se puede observar la consistencia

entre las mediciones, lo que confirma la reproducibilidad de los resultados bajo las mismas condiciones experimentales.

Tabla 1.

Determinación de humedad del afrecho de malta.

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD			
ITEM	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
PESO HUMEDO (PH)	5,001	5,015	5,005
PESO SECO (PS)	4,728	4,745	4,734
PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)	5,459	5,384	5,415
PORCENTAJE DE HUMEDAD PROMEDIO (%)			5,419

Nota. La tabla presenta los valores de peso húmedo, peso seco y el porcentaje de humedad correspondiente a cada una de las tres muestras analizadas. Las columnas muestran los resultados obtenidos, permitiendo una comparación directa entre los valores.

El contenido de humedad reportado por Silva Vargas y Soler Londoño [41] es 5,950%, mientras que en el presente experimento se obtuvo un porcentaje promedio de 5,149%. Se evidencia una leve diferencia entre los datos obtenidos, lo cual podría atribuirse a diversas variables experimentales y características del material, como la composición inicial de humedad del afrecho, el origen de la materia prima y las condiciones de secado.

Un contenido de humedad de 5,194% indica que el afrecho contiene una cantidad mínima de agua, lo que contribuye al buen almacenamiento y también evita el crecimiento de bacterias, adicionalmente se minimiza el riesgo de deterioro durante el almacenamiento. Pese a la diferencia, los valores son comparables y se encuentran dentro de un rango aceptable, evidenciando así que el método de medición es fiable.

2.2.2. Determinación De Cenizas

Para determinar el porcentaje de cenizas en el afrecho de malta, se utilizó la masa previamente secada. Las tres muestras fueron pesadas utilizando una balanza analítica y, posteriormente, sometidas a un proceso de ignición en una muffle a 550°C durante 2 horas. Una vez completado este proceso, las muestras fueron colocadas en un desecador durante 30 minutos para enfriarlas y evitar la absorción de humedad del ambiente. Finalmente, las muestras fueron nuevamente pesadas para determinar la masa de las cenizas residuales. El contenido de cenizas presente en el afrecho de malta se calculó utilizando la ecuación 2, la cual se describe detalladamente en la sección 2.2.2 de este documento.

Tabla 2.

Determinación de cenizas.

DETERMINACIÓN DE CENIZAS			
ITEM	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
PESO SECO (PM)	4,728	4,745	4,734
PESO CENIZAS (PC)	0,098	0,116	0,104
PORCENTAJE DE CENIZAS (%)	2,073	2,445	2,197
PORCENTAJE DE CENIZAS PROMEDIO (%)			2,238

Nota. La tabla presenta los valores de peso seco, peso de cenizas y el porcentaje de cenizas correspondiente a cada una de las tres muestras analizadas. Los resultados de cada una de ellas se encuentran contenidos en las columnas, permitiendo una comparación directa.

Se obtuvo un porcentaje de cenizas de 2,238%, mientras que Silva Vargas y Soler Londoño [41] reportaron un porcentaje de 2,75%. Aunque la diferencia entre estos valores es pequeña, resulta significativa al analizar el impacto que tiene en la calidad del afrecho de malta y su utilidad en procesos posteriores, como la producción de carbohidratos reductores.

El porcentaje de cenizas refleja la cantidad de residuos minerales presentes en el afrecho de malta tras su combustión completa. Un valor más alto de cenizas indica una mayor presencia de material no orgánico, lo que indica que hay una mayor cantidad de impurezas o minerales en el afrecho. Por el contrario, un valor más bajo, como el obtenido en este estudio (2,238%), sugiere que el afrecho contiene menos componentes inorgánicos, lo que podría implicar una mayor pureza del material orgánico. Esta menor cantidad de cenizas favorece la producción de carbohidratos reductores ya que podría facilitar un proceso de conversión más eficiente y así producir una mayor cantidad de carbohidratos reductores.

2.3. Estandarización De Las Condiciones De Operación

Para establecer un proceso eficiente en la producción de etanol a partir del afrecho de malta, se llevó a cabo inicialmente una experimentación a escala de laboratorio. El objetivo principal de esta fase fue comprender, definir y optimizar las condiciones ideales para la hidrólisis ácida del afrecho de malta, un paso crucial en la obtención de carbohidratos reductores necesarios para la fermentación. La eficiencia de la hidrólisis es determinante, ya que influye directamente en la cantidad y calidad de los carbohidratos reductores que serán convertidos en etanol. En esta etapa, se preseleccionaron y evaluaron algunas de las condiciones más favorables para la hidrólisis ácida. Posteriormente, estas condiciones óptimas fueron escaladas, lo que permitió ajustar y validar el proceso en un entorno más cercano a la producción industrial.

El proceso de hidrólisis ácida se diseñó para descomponer el afrecho en azúcares reductores, que son esenciales para la fermentación alcohólica. Para lograr esto, se utilizó ácido clorhídrico en una concentración de 0,1 M, el cual actúa rompiendo las estructuras del afrecho, liberando así los azúcares reductores. Estos azúcares liberados fueron cuantificados utilizando la técnica de Miller, también conocida como el método DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico). Este método se basa en una reacción redox entre el DNS y los azúcares reductores presentes en la muestra, produciendo un cambio de color que se mide a una longitud de onda de 540 nm en un espectrofotómetro.

2.3.1. Preparación De Reactivos

2.3.1.a. *DNS*. Se agregaron 1,6 g de hidróxido de sodio (NaOH), 30 g de tartrato de sodio y potasio (Sal de Seignette) y 1 g de ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS). Posteriormente se disolvió mediante agitación magnética en un volumen de 100 mL de agua destilada.

2.3.1.b. *Ácido Clorhídrico 0,1 M*. Inicialmente se determinó la concentración necesaria de ácido clorhídrico (HCl) para obtener una solución pH 1, como se muestra a continuación:

Ecuación 3. *Concentración molar de iones hidrónio.*

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}]^+$$

$$10^{-\text{pH}} = [\text{H}_3\text{O}]^+$$

$$10^{-(1,0)} = 0,1 \text{ M}$$

En donde:

$[\text{H}_3\text{O}]^+$ = Concentración de iones hidronios.

pH = pH de la solución deseada.

Posteriormente se tomó como punto de partida una solución de ácido clorhídrico con una concentración de 12,07 M, se despejó el volumen de ácido clorhídrico a usar para una solución de 1000 mL como se muestra en la ecuación 4.

Ecuación 4. *Cálculo de Dilución.*

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

$$V_1 = \frac{C_2 \cdot V_2}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{0,1 \text{ M} \cdot 1000 \text{ mL}}{12,07 \text{ M}}$$

$$V_1 = 8,28 \text{ mL}$$

En donde:

V_1 = Volumen de la solución inicial.

C_1 = Concentración de la solución inicial.

V_2 = Volumen de la solución final.

C_2 = Concentración de la solución final.

Teniendo en cuenta lo anterior; en un balón aforado de 1000 mL se agregaron 8,28 mL de ácido clorhídrico de concentración 12,07 M y se completó el volumen del balón con agua destilada.

2.3.2. Curva De Calibración

Se realizó una curva de calibración con el fin de obtener un patrón de glucosa que permitiera determinar de forma matemática la concentración de azúcares reductores presentes en cada una de las muestras de las hidrólisis realizadas.

Se inició preparando una solución madre con una concentración de glucosa de 5000 ppm. En un balón aforado de 100 mL se agregaron 0,5 g de glucosa y se completó el volumen hasta aforar con agua destilada. Posteriormente, mediante la ecuación 4 se realizaron 2 soluciones intermedias. Para la solución intermedia 1 se calculó el volumen necesario de la solución madre para llegar a una concentración de 500 ppm en un volumen de 100 mL, de la siguiente manera:

$$V_2 = \frac{100 \text{ mL} \cdot 500 \text{ ppm}}{5000 \text{ ppm}}$$

$$V_2 = 10 \text{ mL}$$

La solución intermedia 1 se preparó en un balón aforado de 100 mL, se agregaron 10 mL de la solución madre y se completó el aforo con agua destilada.

Para la solución intermedia 2, se replicó el proceso anterior, pero esta vez para llegar a una concentración de 100 ppm en un volumen de 100 mL. De ese modo se aplicó la ecuación 4.

$$V_2 = \frac{100 \text{ mL} \cdot 100 \text{ ppm}}{5000 \text{ ppm}}$$

$$V_2 = 2 \text{ mL}$$

En un balón aforado de 100 mL se agregaron 2 mL de la solución madre y se completó el aforo del balón con agua destilada, obteniendo así la solución intermedia 2. A partir de las soluciones intermedias y empleando la ecuación 4, en tubos de ensayo se prepararon 9 muestras a diferentes concentraciones, utilizando agua destilada y DNS, las proporciones correspondientes se muestran en la tabla 1 y en la tabla 2.

Tabla 3.

Muestras resultantes de la solución intermedia 1.

CONCENTRACIÓN (PPM)	SOLUCIÓN INTERMEDIA 1 (ML)	DNS (ML)	AGUA DESTILADA (ML)
50	1	5	4
100	2	5	3
150	3	5	2
200	4	5	1
250	5	5	0

Nota. La tabla 3 indica las proporciones para la preparación de las muestras provenientes de la solución intermedia 1. Tomado de: E. C. Garzón Rocha Y M.C. Rodríguez Leiton, “Aprovechamiento De Residuos Genrados En Procesos Agroindustriales En La Industria Mezcalera”. Universidad de América. 2023.

Tabla 4.

Muestras resultantes de la solución intermedia 2.

CONCENTRACIÓN (PPM)	SOLUCIÓN INTERMEDIA 1 (ML)	DNS (ML)	AGUA DESTILADA (ML)
10	1	5	4
20	2	5	3
30	3	5	2
40	4	5	1

Nota. La tabla 4 indica las proporciones para la preparación de las muestras provenientes de la solución intermedia 2.

Adicionalmente se preparó la solución “blanco” con una proporción de 5 mL de DNS y 5 mL de agua destilada. Es importante destacar que, para llevar a cabo la reacción entre el DNS y los azúcares reductores de cada una de las muestras, estas se sometieron a una temperatura de 90 °C en un baño termostataado durante 5 minutos. Posteriormente se esperó a que la temperatura de las muestras disminuyera para continuar con la medición en el espectrofotómetro.

Figura 8.

Soluciones estándar para la curva de calibración de glucosa.



Nota. Se exponen las nueve muestras preparadas con DNS a partir de la solución intermedia 1 y solución intermedia 2, para la construcción de la curva de calibración de Glucosa.

Se realizó la medición de las nueve muestras en espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm, los resultados obtenidos se exponen en la tabla 5.

Tabla 5.

Concentración y absorbancia de las soluciones estándar.

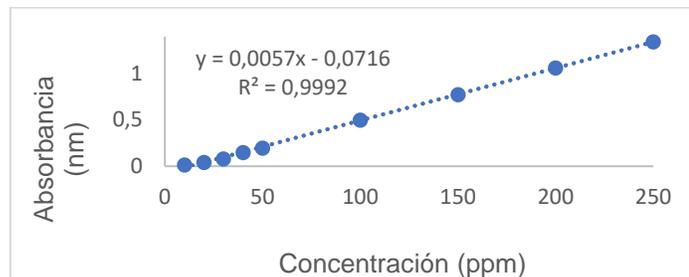
DATOS CURVA DE CALIBRACIÓN		
MUESTRA	CONCENTRACIÓN (PPM)	ABSORBANCIA (NM)
1	10	0,016
2	20	0,043
3	30	0,080
4	40	0,147
5	50	0,197
6	100	0,501
7	150	0,774
8	200	1,063
9	250	1,346

Nota. La tabla muestra los datos correspondientes a la concentración en ppm de cada una de las nueve muestras, así como los valores correspondientes de absorbancia a longitud de onda de 540 nm para cada una de las mismas.

Usando como base los datos de la tabla 5 se construyó la curva de calibración y se realizó una regresión lineal, con el objetivo de obtener una ecuación de recta para así despejar la concentración de azúcares reductores presentes en las muestras de hidrólisis.

Figura 9.

Curva de calibración de Glucosa.



Nota. Gráfica de absorbancia (nm) vs concentración (ppm) de azúcares reductores, mostrando la línea de regresión lineal y el coeficiente R^2 . Tomado de: Elaboración propia.

La línea de regresión indica la relación directa entre la absorbancia medida y la concentración de azúcares reductores presentes en las muestras, con un valor de R^2 de 0,9992, lo cual indica una excelente correlación entre la absorbancia medida y la concentración de azúcares reductores presentes en las muestras. Este valor cercano a 1 es un indicador claro de que el método utilizado para medir y cuantificar los azúcares reductores es altamente preciso. Es decir, las mediciones de absorbancia reflejan de manera muy exacta las concentraciones reales de los azúcares en las muestras sugiere que el modelo de regresión lineal explica el 99,92% de la variabilidad en los datos.

2.3.3. Hidrólisis Ácida En Escala Laboratorio

En la presente investigación se seleccionaron tiempos de reacción de 1, 3 y 5 horas para la hidrólisis ácida del bagazo de malta, basándose en estudios previos que han demostrado la importancia de estos intervalos en la maximización de la conversión de biomasa a azúcares fermentables. Por ejemplo, en un estudio sobre la hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar, se observó que tiempos de reacción de hasta 5 horas permitieron alcanzar rendimientos significativos en la producción de azúcares [42]. Asimismo, otro trabajo que evaluó la hidrólisis ácida diluida en dos etapas también reportó resultados favorables al considerar tiempos intermedios. Estos hallazgos sugieren que los tiempos seleccionados

son adecuados para optimizar el proceso y obtener un balance entre eficiencia y viabilidad económica. Además, se ha documentado que la variación en los tiempos de reacción influye directamente en la eficiencia del proceso, lo que respalda nuestra elección [43].

La elección de 80 °C para la hidrólisis ácida del bagazo de malta se justifica por su capacidad para optimizar la conversión a azúcares fermentables. Estudios indican que esta temperatura evita la degradación de azúcares y la formación de subproductos indeseables, manteniendo un equilibrio entre velocidad de reacción y estabilidad del sistema [44].

La elección de un medio ácido con pH 1 para la hidrólisis ácida del bagazo de malta se fundamenta en su capacidad para maximizar la conversión de polisacáridos a azúcares fermentables. Estudios han demostrado que un pH bajo favorece la ruptura de enlaces glucosídicos, incrementando así el rendimiento de azúcares. Por ejemplo, se ha observado que a valores de pH inferiores a 2 se obtienen rendimientos óptimos en la producción de azúcares reductores, mientras que a pH más altos, como 4 o 5, el porcentaje de azúcares es mínimo [45]. Además, un estudio sobre la hidrólisis ácida con ácido sulfúrico indica que un pH de 1 es efectivo para prevenir la formación de subproductos indeseables que pueden afectar negativamente la fermentación [46]. Estas condiciones son cruciales para optimizar el proceso y mejorar la eficiencia en la producción de etanol.

Para llevar a cabo la hidrólisis ácida del afrecho de malta en escala laboratorio, se diseñó un experimento de un solo factor. En este diseño experimental, se mantuvieron constantes la temperatura a 80 °C y la concentración del ácido clorhídrico ajustada a un pH de 1. El factor variable en este experimento fue el tiempo de reacción, el cual se estableció en tres niveles: 1 hora, 3 horas y 5 horas. Con el fin de asegurar la reproducibilidad de los resultados, se realizaron tres réplicas para cada condición de tiempo, sumando un total de nueve experimentos de hidrólisis.

Para la ejecución de las hidrólisis, se implementó un montaje de reflujo. Este sistema consistió en un tubo condensador, que fue fijado a un soporte universal mediante pinzas, garantizando su estabilidad durante el experimento. Un balón de 250 mL se conectó al tubo

condensador y se colocó sobre una plancha de calentamiento, la cual mantuvo la mezcla a la temperatura deseada. El sistema de refrigeración, crucial para el reflujo, se estableció mediante mangueras que permitieron el flujo continuo de agua a través del tubo condensador, asegurando una eficiente condensación del vapor generado durante la reacción. Además, se utilizó un beaker con agua en cada plancha de calentamiento para monitorear y controlar de manera precisa la temperatura del montaje, garantizando así la estabilidad térmica del sistema. Este enfoque experimental permitió evaluar cómo el tiempo de reacción influye en la eficiencia de la hidrólisis ácida bajo condiciones controladas, proporcionando información valiosa para la optimización del proceso a mayor escala.

Figura 10. Montaje de hidrólisis ácida.



Nota: La figura muestra el montaje de reflujo empleado para realizar seis hidrólisis ácidas.

En cada balón, se agregaron 10 g de afrecho y 100 mL de ácido clorhídrico de pH 1. Se midió nuevamente pH mediante un potenciómetro para verificar que la mezcla se encontrara en el valor adecuado (pH = 1). Con ayuda del beaker posicionado en cada plancha, se midió la temperatura de cada montaje con un termómetro. Una vez alcanzó la temperatura deseada (80 °C), se inició a contar el tiempo establecido para el experimento en ejecución, midiendo de forma regular la temperatura, evitando así posibles alteraciones en la experimentación. Una vez finalizó el tiempo de cada hidrólisis, se suspendió el paso de agua en las mangueras del montaje y se apagaron las planchas de calentamiento.

Cuando la temperatura del sistema disminuyó se continuó con la filtración del hidrolizado para posteriormente cuantificar la concentración de azúcares reductores. Los hidrolizados resultantes, contenían una alta concentración de carbohidratos; a razón de esto, se hizo una dilución de cada experimento para permitir la medición en el espectrofotómetro.

Para realizar la dilución, se utilizó un balón aforado de 100 mL, en el cual se agregó 1 mL del hidrolizado y se aforó hasta el volumen indicado con agua destilada, teniendo hasta este punto una dilución 1:100, es decir, el factor de dilución es 100. Posteriormente, en tubos de ensayo, se agregaron 5 mL de DNS y 5 mL de la solución previamente preparada, que representa la mitad de la mezcla total, lo que proporciona una dilución adicional de 1:2. De tal modo el factor total de dilución es 200.

$$\text{Factor total de dilución} = 100 \cdot 2 = 200$$

Este proceso se reprodujo para cada una de las 9 hidrólisis. Seguido de esto, se colocaron las muestras en un baño termostataado a 90 °C durante 5 min. Una vez disminuyó la temperatura de las muestras, se realizó la medición de absorbancia.

Teniendo como base la curva de calibración construida anteriormente (Figura 10), se empleó la ecuación 5 para hallar la concentración de azúcares reductores presentes en el hidrolizado.

Ecuación 5. *Ecuación de la recta de la curva de calibración de Glucosa.*

$$X = \frac{Y}{0,0057} + 0,0716$$

Donde:

Y = Absorbancia de la muestra de hidrolizado diluido (nm).

X = Concentración de azúcares reductores (ppm).

La concentración hallada mediante la ecuación [5], se multiplicó por el factor total de dilución para así obtener la concentración real. Los resultados obtenidos de los 9 experimentos se ilustran en la tabla 6.

Tabla 6.

Resultados de las hidrólisis en escala laboratorio.

HIDROLISIS ESCALA LABORATORIO								
MUESTRA	t (H)	m (G)	V ÁCIDO (ML)	ABS (NM)	[REAL] (PPM)	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	CV (%)
1	1	10,01	100	0,660	25670,18	25962,58	1206,77	4,65
2	1	10,02	100	0,631	24652,64			
3	1	10,03	100	0,714	27564,92			
4	3	10,02	100	0,911	34477,20	32909,94	1160,31	3,53
5	3	10,00	100	0,832	31705,26			
6	3	10,01	100	0,856	32547,36			
7	5	10,01	100	0,807	30828,08	31061,98	541,56	1,74
8	5	10,01	100	0,835	31810,52			
9	5	10,00	100	0,799	30547,36			

Nota. En la tabla se exponen los resultados de concentración de azúcares reductores de los 9 experimentos realizados en escala laboratorio, así como las condiciones empleadas para cada uno.

Para seleccionar el tiempo óptimo en este proceso de hidrólisis, se evaluaron los resultados obtenidos a los tiempos de reacción de 1, 3 y 5 horas, basándose en la media de las concentraciones, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV). Estos indicadores permiten evaluar la eficiencia del proceso en términos de la cantidad de producto obtenido, así como la consistencia de los resultados.

A 1 hora, la concentración media es de 25,962.58 PPM, con una desviación estándar de 1,206.77 PPM y un coeficiente de variación de 4.65%. Si bien esta etapa ofrece un rendimiento razonable en términos de concentración, la alta variabilidad en los resultados (reflejada en el CV) sugiere que el proceso no ha alcanzado un punto de estabilidad y precisión adecuado. Esto puede generar dificultades para la reproducibilidad del proceso a

largo plazo, lo que lo convierte en un tiempo menos ideal si se busca optimización. A las 3 horas, se observa un aumento significativo en la concentración media a 32,909.94 PPM, con una desviación estándar de 1,160.31 PPM y un CV de 3.53%. Este tiempo muestra un equilibrio óptimo entre la producción de producto y una mejora considerable en la estabilidad del sistema. Aunque el CV es aún algo mayor que el observado a las 5 horas, el incremento en la producción de más de 3,000 PPM respecto al tiempo de 5 horas indica que a las 3 horas se ha alcanzado el punto de mayor eficiencia, lo cual es crítico en términos de optimización del tiempo de proceso. Además, la variabilidad en los datos sigue siendo suficientemente baja como para garantizar una reproducibilidad confiable sin necesidad de alargar el tiempo innecesariamente. Por otro lado, a las 5 horas, aunque se registra una reducción en el CV (1.74%) y la variabilidad es menor, la concentración media de 31,061.98 PPM muestra una ligera disminución en comparación con el tiempo de 3 horas. Si bien este tiempo proporciona resultados con mayor estabilidad, la reducción en la producción sugiere que prolongar el proceso más allá de las 3 horas no trae un beneficio significativo en términos de rendimiento, lo que podría traducirse en un uso ineficiente de recursos y tiempo en escenarios donde se busca la máxima productividad.

Desde una perspectiva de optimización del tiempo y rendimiento del proceso, el tiempo de 3 horas es la opción más adecuada. Aunque el tiempo de 5 horas ofrece una mayor precisión con una mínima variabilidad, el ligero aumento en la estabilidad no justifica la reducción en la concentración de producto obtenida. El incremento en la concentración a las 3 horas es lo suficientemente relevante como para considerar este punto como el de máxima eficiencia, ya que se logra una mayor cantidad de producto con una variabilidad controlada (CV de 3.53%), que sigue siendo aceptable para asegurar la reproducibilidad.

Prolongar el proceso a 5 horas no solo reduce la producción, sino que implica un uso adicional de tiempo y recursos que no resulta proporcionalmente rentable. Por lo tanto, el tiempo de 3 horas representa un equilibrio óptimo entre producción y precisión, maximizando la cantidad de producto sin comprometer de manera significativa la estabilidad del proceso. En un escenario donde se busca optimizar el uso del tiempo y de los insumos, 3 horas es el tiempo recomendado para alcanzar la mayor eficiencia en el

proceso de hidrólisis.

2.4. Producción De Etanol En Escalamiento

Luego de obtener resultados de la hidrólisis en la escala laboratorio, se replicó el proceso para la producción de etanol en una escala mayor. En la fase de laboratorio se seleccionó un tiempo de reacción de 3 horas, se emplearon 10 g de afrecho de malta y 100 mL de HCl a 0.1 M para la hidrólisis ácida. Al escalar el proceso, se ajustaron estos parámetros a 350 g de afrecho y 3500 mL de HCl a la misma concentración y tiempo. Además, se integró un controlador de temperatura para mantener condiciones óptimas durante la hidrólisis, evaluando así la viabilidad del proceso en una producción mayor.

2.4.1. Controlador De Temperatura

Se utilizó un controlador de temperatura W3230, el cual opera con una fuente de alimentación en un rango entre 110 a 220 V CA, lo cual permite su uso en diferentes configuraciones eléctricas, sin necesidad de adaptadores adicionales. La carga de salida se encuentra en un rango de 110 a 220 V CA, con una capacidad de corriente de hasta 10 A, esto se traduce en que puede controlar dispositivos de alta potencia de manera eficiente. Este controlador utiliza un sensor de temperatura NTC, con un rango de medición entre – 50 °C hasta 120 °C, lo que se ajustó de manera adecuada a lo requerido para la hidrólisis ácida. Este controlador ofrece una precisión de $\pm 0,1$ °C. El relé del controlador puede manejar hasta 10 A a 250 V CA, y hasta 20 A a 12 V CA, lo que brindó la seguridad de que controló el dispositivo de manera eficiente y segura. Para la instalación del controlador se requirió de:

- Toma macho con dos cables conductores (rojo/negro).
- Toma hembra con dos cables conductores (rojo/negro).
- Trozo de cable negro de 5 mm (conector).

Inicialmente, se desferraron diferentes secciones del cableado para realizar las

conexiones. En la toma macho, se desferraron dos secciones de cada uno de los cables: una en la punta y otra en la mitad del cable. En la toma hembra, se desferró la punta de cada cable. Finalmente, el cable negro de 5 mm se desferró en ambas puntas.

Prosiguiendo, se conectó el cable rojo de la toma hembra a la sección desferrada en la mitad del cable rojo de la toma macho y se cubrió esta unión con cinta aislante negra. El trozo de cable negro de 5 mm se conectó a la sección desferrada en la mitad del cable negro de la toma macho y se cubrió también con cinta aislante negra.

De este modo, en la toma macho, quedaron dos puntas de cable negro y una de cable rojo. Se tomó la punta correspondiente al trozo de cable de 5 mm, y se conectó al conector 1, el cual se identifica en el controlador como “(+) VCC” (cable fase). La punta de cable negro disponible, se conectó al conector 3, que se identifica en el controlador como “S1” (sensor 1). Finalmente, el cable rojo, se conectó al conector 2, este conector se identifica en el controlador como “(-) GND” (cable neutro). Por otra parte, la toma hembra quedó con un cable rojo disponible, este se conectó en el conector 4, identificado como “S2” (sensor 2). En esta misma toma hembra, se conectó la carga a controlar, concretamente la resistencia del reactor. El controlador, mantuvo una temperatura en el reactor, dentro de un rango de 78 °C – 83° C, asegurando así, que la temperatura de hidrólisis se mantuviera en torno a los 80 °C. Este control garantizó una eficiencia máxima y resultados consistentes en la producción.

2.4.2. Hidrólisis Ácida En Escalamiento Del Proceso

Para el escalamiento, se utilizó un reactor CSTR con una capacidad de 4000 mL cargado con 350 g de afrecho de malta y 3500 mL de ácido clorhídrico con una concentración de 0,1 M. Se midió el pH de la carga total mediante un potenciómetro verificando que este se encontrara 1. El reactor fue ensamblado y sellado correctamente antes de comenzar con la hidrólisis. Una vez alcanzada la temperatura de 80 °C, se inició el conteo del tiempo de reacción, establecido previamente en 3 horas. Durante este tiempo, la temperatura se mantuvo constante a 80 °C mediante una resistencia controlada por el controlador descrito

en la sección “3.3.1.”. También se aseguró una mezcla homogénea mediante agitación constante. Al finalizar las 3 horas, se apagó el sistema de calentamiento y se permitió que el reactor se enfriara a temperatura ambiente. Luego, se procedió a la filtración del hidrolizado mediante un tamiz estándar con una abertura de 1,18 mm y malla 16. Esto se realizó con el objetivo de separar los sólidos de la solución. El hidrolizado resultante se preparó para análisis posteriores, utilizando la metodología establecida en escala laboratorio. Se realizó una dilución 200 veces inferior.

Figura 11.

Sistema experimental para hidrólisis ácida en reactor CSTR.



Nota. La figura muestra el montaje experimental empleado para realizar hidrólisis ácida en un reactor de tanque agitado continuamente (CSTR). El sistema cuenta con un sistema de calentamiento controlado por una resistencia eléctrica y un controlador de microcomputadora que permite ajustar la temperatura de reacción de manera precisa. Al finalizar la reacción, la mezcla resultante se filtra utilizando una malla para separar los sólidos de la solución líquida.

La concentración de azúcares reductores se determinó empleando la ecuación 5 y la lectura de absorbancia que se realizó mediante el método DNS, usando un espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm. Este procedimiento se replicó 3 veces y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.

Resultados de las hidrólisis en escalamiento del proceso.

HIDRÓLISIS ÁCIDA ESCALAMIENTO				
MUESTRA	ABSORBANCIA (NM)	CONCENTRACIÓN (PPM)	CONCENTRACIÓN FACTOR DILUCIÓN (PPM)	TOTAL PRODUCIDO (ML)
1	0,801	153,087	30617,540	2840
2	0,851	161,859	32371,920	2760
3	0,838	159,578	31915,780	2790

Nota. En la tabla se ilustran los resultados de las tres muestras que se llevaron a cabo en escalamiento. Realizadas bajo las mismas condiciones; temperatura: 80°C, tiempo: 3 horas, masa: 350 g y volumen de ácido empleado: 3500 mL. Adicionalmente se muestran los valores de hidrolizado obtenido, absorbancia, concentración en ppm y concentración real luego de aplicar el factor de dilución descrito en la sección 3.3.3.

Los resultados obtenidos en comparación entre la escala laboratorio y el escalamiento de la hidrólisis ácida muestran diferencias poco significativas en las concentraciones de azúcares reductores. En la escala de laboratorio, se midieron concentraciones de azúcares reductores de 34477,20 ppm, 31705,26 ppm, y 32547,36 ppm, con un promedio de 32,909.94 ppm tras un tiempo de reacción de 3 horas. Las concentraciones obtenidas en la escala mayor alcanzaron 30617,54 ppm, 32371,92 ppm, y 31915,78 ppm, con un promedio de 31634.08 ppm.

Aunque se utilizó el mismo tiempo de reacción y la misma temperatura, la escala laboratorio logró una concentración promedio superior, esto puede atribuirse a la diferencia de condiciones entre ambas escalas.

La escala de laboratorio, con un montaje tipo reflujo y ausencia de agitación, presenta limitaciones en la transferencia de masa y calor. La falta de agitación puede generar zonas con diferentes concentraciones de ácido y temperaturas, afectando la eficiencia de la

reacción.

En contraste con el escalamiento del proceso, compuesto por un reactor CSTR, agitación mecánica y control preciso de la temperatura, ofrece condiciones más favorables para la hidrólisis. El reactor CSTR promueve una mezcla homogénea de los reactivos, asegurando que todas las partículas de afrecho entren en contacto con el ácido. La agitación constante evita la formación de zonas muertas y maximiza la superficie de contacto, mientras que el control de temperatura garantiza que la reacción se lleve a cabo a la temperatura óptima, de modo que se genera una reacción más controlada y reproducible, lo que es crucial en un entorno de producción a mayor escala.

2.4.3. Fermentación De Azúcares

Para llevar a cabo la fermentación del hidrolizado resultante, primero, se realizó una solución de hidróxido de sodio a una concentración de 5 M, se preparó disolviendo 20 g de hidróxido de sodio en 100 mL de agua destilada. Esto se hizo con el objetivo de neutralizar el hidrolizado que se encontraba en pH 1 y se ajustó a pH 7 con la ayuda de un potenciómetro. Este procedimiento fue necesario para crear un ambiente adecuado para la fermentación. Posteriormente, se fraccionó cada hidrolizado neutralizado en 2 frascos amber con un contenido de 500 mL cada uno. De manera que se obtuvieron 6 frascos amber que se dispusieron para fermentación.

Luego, se realizaron dos tipos de fermentación utilizando diferentes tipos de levadura: levadura de pan y levadura de whisky. Para la fermentación con levadura de pan, basado en la metodología descrita por E. C. Garzón Rocha y M.C. Rodríguez Leiton [47], se utilizó “Levapan”, la dosificación utilizada fue de 2 g de levadura por cada 100 mL de hidrolizado. Para realizar la activación de la levadura, en un beaker de 200 mL, se agregaron 30 g de la misma y se adicionaron 150 mL de agua destilada a una temperatura de 25°C, esta solución se dejó reposar durante 15 minutos, y posteriormente se agitó suavemente. Finalmente se dividió en tres partes iguales con el propósito de realizar tres fermentaciones independientes partiendo de esta mezcla.

Figura 12.

Levadura Levapan.



Nota. En la imagen se ilustra la levadura utilizada para desarrollar la fermentación con levadura de pan.

Para la fermentación con levadura de whisky, se utilizó la levadura “SAF SPIRIT M – 1”, la dosificación recomendada por el fabricante es de 50 a 80 g de levadura por cada 100 litros de hidrolizado, y esta cantidad, se rehidrata en una concentración de 10 veces su volumen de agua. Para el presente documento, se usó una dosificación de 60 g por cada 100 litros de hidrolizado. Para la activación de la levadura, se utilizó un beaker de 50 mL, en el cual se agregaron 2 g de levadura y 20 mL de agua destilada a 25 °C, esta solución se dejó reposar durante 15 minutos y posteriormente se agitó suavemente. De esta solución se agregaron 4 mL en cada uno de los frascos amber restantes, con la finalidad de realizar tres fermentaciones independientes.

Figura 13.

Levadura SAFSPIRIT M – 1.



Nota. En la imagen se ilustra la levadura SAFSPIRIT M – 1 de la marca Fermentis, la cual se empleó para realizar las fermentaciones con levadura de whisky.

Las fermentaciones se llevaron a cabo en un baño termostático a 25°C, asegurando que la temperatura se mantuviera constante durante todo el proceso. Se seleccionó esta temperatura ya que es ideal para las condiciones de crecimiento y actividad metabólica tanto de la levadura de pan como de la levadura de whisky, que se utilizaron para fermentar el hidrolizado de malta.

El control preciso de la temperatura mediante un baño termostático garantiza que las levaduras funcionen de manera eficiente, facilitando la conversión de los azúcares presentes en el hidrolizado de malta en alcohol. Además, esta estabilidad térmica evita la formación de subproductos indeseados que podrían surgir debido al estrés térmico o a la fluctuación de la temperatura.

Figura 14.

Fermentaciones de afrecho de malta.



Nota. La imagen muestra las fermentaciones realizadas, dos con levadura de pan y dos con levadura de whisky.

Adicionalmente, se monitoreó continuamente la concentración de azúcares fermentables utilizando el método DNS, para garantizar condiciones óptimas. Conforme avanzaban los días de fermentación, se observó una disminución progresiva en la concentración de azúcares, lo cual indicaba la actividad de las levaduras y la conversión de los azúcares en productos fermentativos.

Tabla 8.

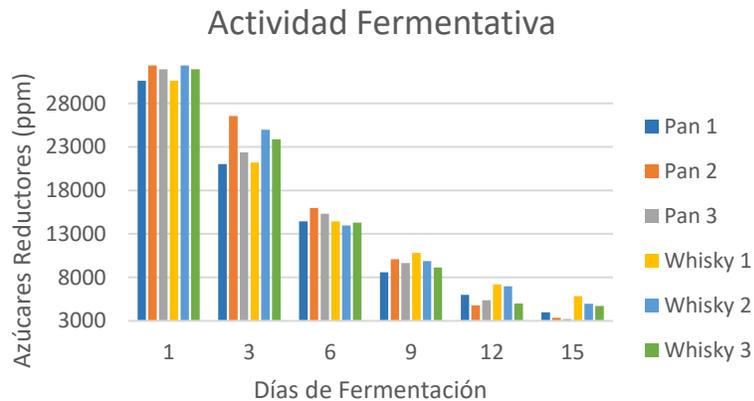
Actividad fermentativa de levaduras en fermentaciones de pan y whisky.

CONCENTRACIÓN (PPM)						
DÍA	PAN 1	PAN 2	PAN 3	WHISKY 1	WHISKY 2	WHISKY 3
1	30617,54	32371,92	31915,78	30617,54	32371,92	31915,78
3	21011,70	26526,69	22357,81	21187,36	24981,25	23884,09
6	14442,11	15965,78	15323,02	14424,56	13962,11	14277,23
9	8582,46	10091,23	9632,58	10828,07	9865,21	9135,65
12	5985,96	4792,98	5360,15	7178,95	6987,84	5015,97
15	3985,96	3354,39	3211,63	5845,61	4962,34	4698,25

Nota. Las concentraciones de pan y whisky se midieron mediante el método DNS para cuantificar los azúcares fermentables. Los valores expresados en la tabla representan los resultados de estas mediciones en días específicos de las fermentaciones

Figura 15.

Comportamiento Actividad Fermentativa



Nota. La figura muestra el comportamiento de las 6 fermentaciones (3 de pan y 3 de whisky), en las que se determinó la cantidad de azúcares reductores (ppm) utilizando el método DNS. A medida que avanzaron los días de fermentación, se observó una disminución en la cantidad de azúcares.

Para calcular el rendimiento de la fermentación con base en los azúcares reductores, se utilizó la ecuación 6, empleando la concentración inicial y final de azúcares reductores para cada lote fermentativo.

Ecuación 6. *Porcentaje del rendimiento.*

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{\text{Azúcares Iniciales} - \text{Azúcares Finales}}{\text{Azúcares Iniciales}} \right) \cdot 100$$

Tabla 9.

Rendimiento de azúcares reductores.

RENDIMIENTO (%)					
Pan 1	Pan 2	Pan 3	Whisky 1	Whisky 2	Whisky 3
87,00	89,64	89,94	80,92	84,64	85,28

Nota. Rendimiento de azúcares reductores durante las fermentaciones con levadura de pan y whisky.

La disminución de la concentración de azúcares reductores a lo largo de los días de fermentación es un comportamiento esperado, explicado por el metabolismo de las levaduras, que convierten estos azúcares en etanol y dióxido de carbono. Durante el proceso de fermentación, las levaduras utilizan los azúcares del medio como fuente de energía, transformándolos en etanol a través de la glucólisis y la fermentación alcohólica. En estos experimentos, los rendimientos obtenidos reflejan esta dinámica, con una notable reducción en los azúcares a medida que la fermentación avanza. Evidenciado por los rendimientos obtenidos: 87.00% para Pan 1, 89.64% para Pan 2, 89.94% para Pan 3, y entre 80.92% y 85.28% para las fermentaciones con levadura de whisky. Estos valores sugieren una conversión eficiente de azúcares en etanol, reflejando el desempeño metabólico de las levaduras.

2.4.4. Destilación De Fermentaciones

Para el análisis de los productos obtenidos de las fermentaciones realizadas con hidrolizados de afrecho de malta, se llevó a cabo un proceso de destilación en varias etapas, con el objetivo de separar el etanol y otros componentes presentes en las mezclas fermentadas. Se utilizó un rotaevaporador, el cual operó a una presión de 175 mbar, con una velocidad de rotación de 200 rpm y una temperatura de baño de agua constante a 60°C. Las fermentaciones se dividieron en dos grupos: uno con levadura de whisky y otro con levadura de pan. El procedimiento incluyó destilaciones simples y destilaciones extractivas empleando glicerina para lograr la separación y concentración deseada.

Figura 16.

Rotaevaporador.



Nota. En la imagen se muestra el rotaevaporador que se empleó para realizar las destilaciones simples y extractivas.

2.4.4.a. Destilación Simple. Para la separación del etanol, se llevaron a cabo dos destilaciones simples para cada una de las muestras, utilizando un rotaevaporador bajo las condiciones previamente descritas. Se destilaron un total de 6 muestras, compuestas por 3 fermentaciones con levadura de whisky y 3 fermentaciones con levadura de pan. Cada etapa del proceso de destilación tuvo una duración de 2 horas. La primera destilación permitió extraer el etanol junto con otros compuestos volátiles presentes en la mezcla, mientras que la segunda destilación se enfocó en aumentar la concentración y pureza del etanol obtenido.

Tabla 10.*Destilación simple. Etapa (1) y (2).*

DESTILACIONES										
	TIPO	WHISKY 1			WHISKY 2			WHISKY 3		
	VARIABLE	DENSIDAD	VOL. I (ML)	VOL. F (ML)	DENSIDAD	VOL. I (ML)	VOL. F (ML)	DENSIDAD	VOL. I (ML)	VOL. F (ML)
ETAPA	1	1,0508	300	46	0,9970	300	52	1,0098	300	66
	2	0,9623	46	17	0,9549	52	40	0,9968	66	51
	TIPO	PAN 1			PAN 2			PAN 3		
	VARIABLE	DENSIDAD	VOL. I (ML)	VOL. F (ML)	DENSIDAD	VOL. I (ML)	VOL. F (ML)	DENSIDAD	VOL. I (ML)	VOL. F (ML)
ETAPA	1	1,1223	300	49	1,0498	300	38	1,0603	300	38
	2	1,1126	49	41	1,0232	38	27	1,0092	38	28

Nota. La tabla presenta los resultados de las dos destilaciones simples realizadas para cada una de las seis muestras de fermentación, las cuales incluyen tres muestras con levadura de whisky y tres con levadura de pan. En la tabla se detallan los volúmenes de etanol recolectados en cada etapa del proceso de destilación.

En la primera destilación simple de las tres fermentaciones con levadura de whisky, se obtuvo una densidad promedio de 1,0192 g/ml. Dado que este valor seguía siendo elevado, se procedió a una segunda destilación simple, logrando reducir la densidad promedio a 0,9713 g/ml. Sin embargo, el volumen de etanol obtenido en cada muestra individual no fue suficiente para medir con precisión los grados de alcohol. Por lo tanto, se decidió combinar las muestras, ya que sus densidades eran muy similares. Esto resultó en un volumen total de 108 mL de etanol con una concentración del 62%.

Figura 17.

Medición de alcohol levadura de whisky. Destilación (2).



Nota. En la imagen se observa la medición de grados de alcohol utilizando un alcoholímetro de Gay – Lussac. El resultado muestra una concentración de alcohol del 62%, indicando un producto de alta pureza obtenido tras dos destilaciones simples.

Por otro lado, en la primera destilación simple de las tres fermentaciones con levadura de pan, se obtuvo una densidad promedio de 1,0774 g/ml. Considerando este valor, se realizó una segunda destilación, que redujo la densidad promedio a 1,0483 g/ml. El volumen total obtenido de las tres muestras combinadas fue de 96 mL, con una concentración del 40%.

Figura 18.

Medición de alcohol levadura de pan. Destilación (2).



Nota. En la imagen se muestra la medición de grados de alcohol empleando un alcoholímetro de Gay – Lussac. El resultado muestra una concentración de alcohol del 40% después de destilaciones simples.

2.4.4.b. *Destilación Extractiva.* En la etapa inicial de destilaciones simples, se obtuvieron concentraciones de etanol del 40% para pan y del 62% para la levadura de whisky. Posteriormente, se realizaron destilaciones extractivas, un proceso que se emplea principalmente para deshidratar etanol. Esta técnica es ampliamente preferida en la industria debido a su eficiencia energética y sus costos de operación relativamente bajos. Además, los solventes utilizados en este proceso suelen ser no peligrosos, lo que contribuye a que el proceso sea más seguro y sostenible [48].

El glicerol es un solvente comúnmente utilizado en la destilación extractiva debido a su baja volatilidad, lo que asegura su permanencia en la fase líquida. Además, tiene la capacidad de alterar las volatilidades relativas de los componentes de la mezcla, favoreciendo la separación. Es crucial que el solvente tenga un punto de ebullición superior al de los componentes a separar; en este caso, el punto de ebullición del glicerol es 290°C, lo cual es adecuado, ya que el punto de ebullición de la mezcla azeotrópica es 78,2°C [49]. Se utilizó glicerina en una proporción de 0,4, ya que, según los resultados de Cristancho Perilla [50], esta proporción permite obtener los mejores resultados de concentración de etanol. Los resultados obtenidos en la primera destilación extractiva se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11. Resultados de las destilaciones extractivas de la levadura de whisky.

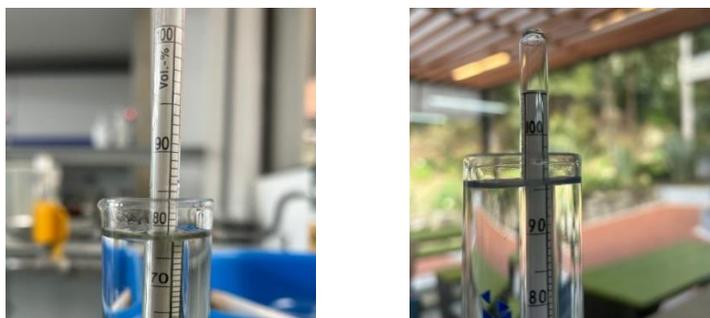
WHISKY						
DESTILACIÓN	ETAPA	DENSIDAD (G/ML)	VOLUMEN MUESTRA (ML)	ALCOHOL (%V/V)	VOLUMEN ALCOHOL (ML)	MASA ALCOHOL (G)
3	INICIAL	0,9713	108	0,62	66,96	65,0404
	FINAL	0,9503	68	0,79	53,72	51,0501
4	INICIAL	0,9503	68	0,79	53,72	51,0501
	FINAL	0,9367	54	0,96	51,84	49,1806

Nota. Esta tabla presenta los resultados obtenidos de dos destilaciones extractivas, incluyendo la densidad de cada destilado a una temperatura de 20°C, el volumen de etanol producido, el porcentaje de alcohol (% v/v) y la masa total de alcohol obtenida.

En la tercera destilación, se partió de un volumen inicial de 108 ml, previamente obtenido de la destilación 2 con un 62% de grados de alcohol. Esta destilación resultó en un volumen final de 68 ml con un porcentaje de alcohol del 79%. Debido a la baja concentración obtenida, fue necesario realizar una cuarta destilación extractiva. En esta etapa, se produjo un volumen de 54 ml con una concentración de alcohol del 96%, obteniéndose una masa total de alcohol de 49,18 g.

Figura 19.

Medición grados de alcohol levadura de whisky. Destilación (3) y (4).



Nota. En la imagen se muestra la medición de los grados de alcohol utilizando un alcoholímetro de Gay-Lussac. En la primera imagen, se observa que el etanol tiene una concentración del 79%, mientras que en la segunda imagen se evidencia una concentración de etanol del 96%..

Considerando estos resultados, se evaluó el rendimiento producto-sustrato. Para este cálculo, se tomó en cuenta que el sustrato total consumido fue de 25,31 g, mientras que la cantidad de producto (alcohol) obtenido al alcanzar la concentración máxima fue de 49,18 g.

Con esta información, se determinó que el rendimiento producto-sustrato es de 1,94 lo que indica que, por cada gramo de sustrato consumido, se produce 1,94 gramos de alcohol. Este valor es relevante para evaluar la eficiencia del proceso de destilación y la conversión del sustrato en producto final. Sin embargo, la baja concentración de alcohol obtenida en

la tercera destilación (0,79%) y la necesidad de una cuarta destilación extractiva sugieren que el proceso podría requerir ajustes para mejorar la eficiencia en la separación y concentración del alcohol.

Tabla 12.

Resultados de las destilaciones extractivas de la levadura de pan.

PAN						
DESTILACIÓN	ETAPA	DENSIDAD (G/ML)	VOLUMEN MUESTRA (ML)	ALCOHOL (%V/V)	VOLUMEN ALCOHOL (ML)	MASA ALCOHOL (G)
3	INICIAL	1,0483	93	0,4	37,2	38,9980
	FINAL	0,9503	46	0,54	24,84	23,6054
4	INICIAL	0,9503	46	0,54	24,84	23,6054
	FINAL	0,9487	40	0,54	21,6	20,4919

Nota. Esta tabla presenta los resultados obtenidos de dos destilaciones extractivas de la levadura de pan, incluyendo la densidad de cada destilado a una temperatura de 20°C, el volumen de etanol producido, el porcentaje de alcohol (% v/v) y la masa total de alcohol obtenida.

En la tercera destilación, se partió de un volumen inicial de 93 ml, obtenido previamente de la destilación 2 con un 40% de grados de alcohol. Esta destilación resultó en un volumen final de 46 ml con una concentración de alcohol del 54%. Dado que la concentración no aumentó significativamente, fue necesario realizar una cuarta destilación extractiva. En esta etapa, se obtuvo un volumen de 40 ml, pero la concentración de alcohol se mantuvo en el 54%, resultando en una masa total de alcohol de 20,49 g.

Figura 20.

Medición grados de alcohol levadura de pan. Destilaciones 3 y 4.



Nota. En la imagen se muestra la medición de los grados de alcohol utilizando un alcoholímetro de Gay-Lussac. Se observa que el etanol tiene una concentración del 54%.

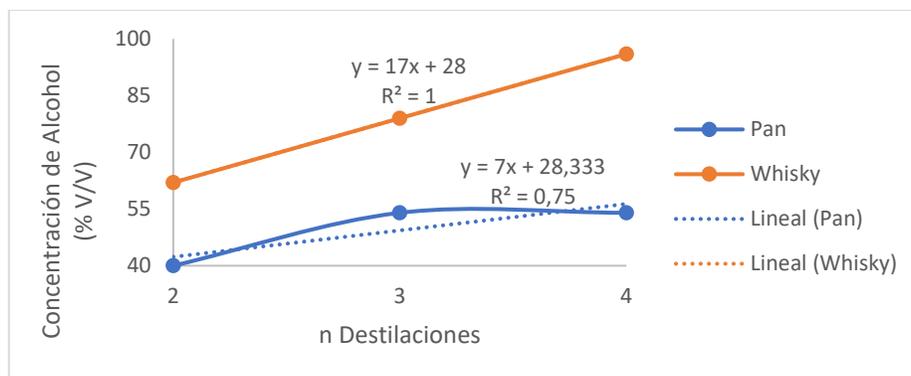
Teniendo en cuenta lo anterior se evaluó el rendimiento producto-sustrato. Donde el sustrato total consumido fue 25,31 g, mientras que la cantidad de producto obtenido al alcanzar la máxima concentración de 54% fue de 20,49 g, de modo que el rendimiento de la levadura de pan es 0,81, lo que significa que se produjeron 0,81 gramos de alcohol por cada gramo de sustrato consumido. Este rendimiento proporciona una medida de la eficiencia del proceso en convertir el sustrato en alcohol. Un rendimiento de 0,81 sugiere que el proceso tiene una eficiencia moderada en la conversión del sustrato en producto final. Si se busca mejorar la eficiencia, podrían ser necesarios ajustes en las etapas de destilación o en la formulación del proceso.

Al comparar los destilados obtenidos de levadura de whisky y de levadura de pan, se observa una notable diferencia en eficiencia y pureza del etanol producido. La levadura de whisky resultó en un destilado con un 96% de etanol y un rendimiento producto-sustrato de 1,94, lo que indica una conversión altamente eficiente, produciendo 1,94 gramos de alcohol por cada gramo de sustrato consumido. Este resultado no solo demuestra una excelente eficiencia, sino también una alta pureza del etanol, cercana al máximo teórico.

En contraste, el destilado a partir de levadura de pan alcanzó solo un 54% de etanol y un rendimiento de 0,81. Esto significa que la conversión del sustrato en alcohol fue mucho menos eficiente, con solo 0,81 gramos de alcohol producidos por cada gramo de sustrato. Además, la pureza del etanol es significativamente inferior, lo que indica un proceso menos eficaz.

Figura 21.

Comparación de la concentración de alcohol (% v/v) en diferentes destilaciones con dos tipos de levadura.



Nota. La gráfica muestra la concentración de alcohol (% v/v) obtenida en distintas destilaciones (2, 3 y 4) utilizando dos tipos de levaduras: levadura de whisky y levadura de pan.

En la gráfica se observa un comportamiento claramente diferente entre las dos levaduras. La levadura de whisky muestra un incremento significativo en la concentración de alcohol a medida que se avanza en las destilaciones, pasando de 62% en la segunda destilación a 79% en la tercera destilación y alcanzando un 96% en la cuarta. Este aumento constante indica que la levadura de whisky es más eficiente en la producción de etanol, logrando concentraciones más altas con cada destilación sucesiva. Por otro lado, la levadura de pan muestra un comportamiento distinto. En la segunda destilación, la concentración de alcohol alcanzó un 40%, pero en las destilaciones tercera y cuarta, la concentración se estabilizó en un 54%, sin aumentar más. Esto muestra que la levadura de pan tiene una capacidad

limitada para producir etanol en concentraciones más altas o que podría estar alcanzando un límite en su eficiencia dentro de las condiciones del proceso de destilación utilizado. En conclusión, la levadura de whisky demuestra una mayor capacidad para concentrar alcohol a través de destilaciones sucesivas en comparación con la levadura de pan. No solo produce etanol de mayor pureza (96%), sino que también maximiza el rendimiento del proceso, convirtiendo más eficientemente el sustrato en producto final. Esto reduce la necesidad de etapas adicionales de destilación y mejora la eficiencia global del proceso, haciendo que la levadura de whisky sea la opción preferida para obtener etanol de alta calidad.

2.4.5. Balance De Masa

El análisis de los rendimientos y el balance de masa muestra que, al utilizar 350 g de bagazo de malta, 12,76 g de HCl y 3487,24 g de agua, se generó un mosto de 2939,22 g. Este mosto se dividió en dos mitades: la primera, fermentada con levadura de whisky, produjo 229,22 g de etanol, logrando un rendimiento del 65,49%; la segunda, con levadura de pan, resultó en 95,5 g de etanol, con un rendimiento del 27,29%. Esto sugiere que la levadura de whisky es más eficiente en la conversión de materia prima, mientras que el balance de masa confirma que, a pesar de la división del mosto, se lograron resultados significativos.

Tabla 13.

Balance de masa y rendimiento global.

BALANCE DE MASA (G)							
PROCESO	COMPONENTE	ENTRADA	SALIDA	PROCESO	COMPONENTE	ENTRADA	SALIDA
Hidrólisis ácida (Reactor)	Bagazo de Malta	350	0	Destilación Extractiva 2 (Levadura de Whisky)	Etanol (79%)	237,94	0
	Ácido Clorhídrico (HCl)	12,76	0		Glicerina	95,18	95,18
	Agua	3487,24	0		Etanol (96%)	0	229,22
	Mosto	0	2939,22		Agua	0	8,72
	Residuo	0	910,78		Total	333,12	333,12
	Total	3850	3850		Mosto Pan	1469,61	0
Separación	Mosto Total	2939,22	0	Fermentación (Levadura de Pan)	Levadura Pan	27,96	0
	Mosto Whisky	0	1469,61		Agua + Etanol	0	875,92
	Mosto Pan	0	1469,61		Biomasa	0	621,65
	Total	2939,22	2939,22		Total	1497,57	1497,57
Fermentación (Levadura de Whisky)	Mosto Whisky	1469,61	0	Destilación Simple 2 (Levadura de Pan)	Agua + Etanol	875,92	0
	Levadura Whisky	0,84	0		Etanol (40%)	0	181,73
	Agua + Etanol	0	881,79		Agua	0	694,19
	Biomasa	0	588,66		Total	875,92	875,92
	Total	1470,45	1470,45	Destilación Extractiva 1 (Levadura de Pan)	Etanol (40%)	181,73	0
Destilación Simple 2 (Levadura de Whisky)	Agua + Etanol	881,79	0		Glicerina	72,692	72,692
	Etanol (62%)	0	307,81		Etanol (54%)	0	109,99
	Agua	0	573,98		Agua	0	71,74
	Total	881,79	881,79	Destilación Extractiva 2 (Levadura de Pan)	Etanol (54%)	109,99	95,5
Destilación Extractiva 1 (Levadura de Whisky)	Etanol (62%)	307,81	0		Glicerina	44,00	44,00
	Glicerina	123,12	123,12		Agua	0	14,49
	Etanol (79%)	0	237,94		Total	153,986	153,986
	Agua	0	69,87	RENDIMIENTO GLOBAL (%)	Levadura de Whisky		65,49
	Total	430,93	430,93		Levadura de Pan		27,29

Nota. La tabla refleja el balance de masa y rendimientos globales obtenidos de 350 g de bagazo de malta, considerando la división del mosto en dos partes para la fermentación con levaduras de whisky y pan.

3. CONCLUSIONES

La caracterización del bagazo de malta se centró en la determinación de su contenido de humedad y cenizas, dos parámetros cruciales para evaluar su calidad y comportamiento en procesos industriales. La humedad promedio de 5,42% obtenido en el estudio indica un nivel adecuado que permite un almacenamiento seguro, minimizando riesgos de deterioro. Comparado con el dato de Silva Vargas y Soler Londoño [47], la diferencia en los resultados puede ser atribuida a variaciones en el proceso de secado y las características del material. Por otro lado, el contenido de cenizas promedio de 2,24% sugiere una baja presencia de impurezas, lo que podría beneficiar la eficiencia en la producción de carbohidratos reductores. La comparación con el estudio de referencia resalta la relevancia de estos valores en la calidad del afrecho y su potencial para aplicaciones posteriores.

En la etapa de hidrólisis ácida en laboratorio, se evaluaron tres tiempos de reacción (1, 3 y 5 horas) bajo condiciones controladas (80 °C, pH 1), donde se midieron la concentración de azúcares reductores y la estabilidad de los resultados para determinar el tiempo óptimo. A 1 hora, la concentración media fue de 25,962.58 PPM, con un coeficiente de variación del 4.65%, lo que indica una alta variabilidad y menor estabilidad. A 3 horas, se observó una mayor concentración media de 32,909.94 PPM, con una mejora en la estabilidad y un coeficiente de variación de 3.53%. Este tiempo mostró el punto de mayor eficiencia, ya que logró la mayor producción de azúcares con una variabilidad controlada. A las 5 horas, aunque el coeficiente de variación disminuyó al 1.74%, la concentración media fue ligeramente menor, lo que sugiere que no hay un beneficio significativo en prolongar el tiempo.

El tiempo de 3 horas es óptimo, ya que proporciona un equilibrio entre la máxima producción y la precisión del proceso, con una variabilidad aceptable para asegurar la reproducibilidad. Prolongar el tiempo a 5 horas, aunque reduce la variabilidad, no mejora significativamente el rendimiento y podría implicar un uso ineficiente de recursos. Por tanto, se recomienda el tiempo de 3 horas para maximizar la eficiencia del proceso de hidrólisis ácida.

En el escalamiento, las concentraciones de azúcares reductores obtenidas son ligeramente menores que en la escala de laboratorio, el proceso en un reactor CSTR ofrece una ventaja significativa en términos de homogeneidad de la mezcla y control preciso de las condiciones de reacción. A pesar de utilizarse el mismo tiempo y temperatura, la diferencia en las concentraciones promedio (32,909.94 ppm en laboratorio frente a 31,634.08 ppm en escalamiento) puede atribuirse a la agitación constante y al control de temperatura en la escala mayor. lo que asegura una mejor eficiencia en la transferencia de masa y calor. En el reactor CSTR, la mezcla homogénea y la optimización del contacto entre el afrecho y el ácido permiten una reacción más uniforme y reproducible. Estas condiciones más controladas justifican el escalamiento del proceso y sugieren que, aunque la concentración de azúcares es menor en comparación con la escala de laboratorio, los resultados en la escala superior son más consistentes y fácilmente replicables en un entorno industrial. Los valores obtenidos en esta etapa (30617,54 ppm, 32371,92 ppm, 31915,78 ppm) se encuentran dentro de un rango similar al observado en el laboratorio, aunque con una menor variación entre muestras. Esto confirma la viabilidad del escalamiento para optimizar el proceso sin comprometer la producción de azúcares reductores, destacando que la tecnología del reactor CSTR proporciona un control superior para la producción a gran escala.

González et al. (2018) obtuvo una concentración máxima de azúcares reductores de aproximadamente 30,000 PPM en la hidrólisis ácida del almidón a 90 °C y pH 1 durante 2 horas, lo que es comparable a la concentración media de 32,909.94 PPM lograda en este estudio a las 3 horas. Sin embargo, el coeficiente de variación en el presente estudio (3.53%) es mayor que el reportado por González et al. (2.5%), lo que sugiere que, a pesar de la mayor producción, existe un margen de mejora en la estabilidad del proceso [51]. Finalmente, Martínez y Pérez (2015) encontraron que la hidrólisis ácida del glucógeno a pH 1 y temperaturas similares alcanzó un rendimiento óptimo en tiempos de 30 minutos a 1 hora, con concentraciones medias alrededor de 28,000 PPM. Esto apoya la conclusión del estudio sobre la eficiencia del proceso a 3 horas en comparación con 5 horas, indicando que prolongar el tiempo de reacción no siempre resulta en un mayor rendimiento, lo que valida la selección de 3 horas como el tiempo óptimo para la hidrólisis en el afrecho de

malta [52].

En la etapa de fermentación de azúcares reductores se evidencian diferencias claras en el comportamiento de las levaduras de pan y de whisky. En las fermentaciones con levadura de pan, se alcanzaron rendimientos superiores al 87%, reflejando su capacidad para metabolizar de manera eficiente una amplia gama de azúcares en medios controlados. La rápida disminución de azúcares durante los primeros días indica una tasa de conversión elevada, con un descenso notable entre los días 1 y 6, lo que sugiere un metabolismo activo y sostenido. Esta cinética rápida es común en cepas adaptadas a un consumo veloz de sustratos y refleja la capacidad de la levadura de pan para mantener altos niveles de actividad fermentativa en condiciones óptimas. Por otro lado, las fermentaciones con levadura de whisky presentaron rendimientos más bajos, entre el 80.92% y el 85.28%. A pesar de ser menor en comparación con la levadura de pan, estos valores siguen siendo indicativos de una conversión eficiente de los azúcares presentes en el hidrolizado de afrecho. La tasa de consumo de azúcares en las fermentaciones con levadura de whisky fue más lenta, lo que podría deberse a una menor adaptación de esta levadura a las condiciones específicas del medio o a una cinética fermentativa más moderada. Aunque la levadura de whisky tiende a tener un desempeño más estable en medios más robustos como los utilizados en la destilación de alcoholes más concentrados, en este caso su rendimiento fue adecuado, aunque inferior al de la levadura de pan. Al comparar ambas levaduras, se puede concluir que la levadura de pan demostró una mayor eficiencia en la conversión de azúcares, posiblemente debido a su capacidad para adaptarse rápidamente a las condiciones de cultivo y su perfil metabólico favorable. Por su parte, la levadura de whisky, aunque menos eficiente en términos de rendimiento global, aún mostró un comportamiento adecuado en la fermentación, con tasas de conversión consistentes a lo largo del tiempo.

En un estudio realizado por Solano y Carro (2020), se destaca que la levadura *Saccharomyces Cerevisiae*, comúnmente utilizada en panificación, tiene una alta capacidad fermentativa, alcanzando rendimientos de hasta el 90% en condiciones óptimas. Lo que se confirma con los rendimientos obtenidos por parte de ambas levaduras,

reforzando la idea de su eficiencia en la conversión de azúcares en etanol y CO_2 [53]. Adicionalmente, según un artículo sobre el uso de levaduras en la producción de whisky (WDE Whisky, 2021), *Saccharomyces Cerevisiae*, es elegida por su capacidad para tolerar altas concentraciones de alcohol y su habilidad para convertir azúcares en alcohol a tasas moderadas. El rendimiento típico en estas fermentaciones varía entre el 75% y el 85%, lo que coincide con los resultados obtenidos [54].

Es importante resaltar, que los análisis de resultados de las destilaciones, tanto simples como extractivas, expuestos a continuación son con base a un lote (1) de fermentación (500 mL), posteriormente, se mostraran los resultados obtenidos con el total del mosto fermentado.

El resultado de las destilaciones simples muestra que la levadura de whisky produce etanol de alta pureza (62%) con un volumen final de 108 mL, aunque con un rendimiento limitado. En contraste, la levadura de pan genera 96 mL de etanol, pero con una menor concentración (40%). Esto sugiere que la levadura de whisky es más eficiente en la conversión de azúcares. La levadura de pan parece generar más subproductos, afectando negativamente la pureza y cantidad de etanol obtenido. Estos resultados resaltan las diferencias en la capacidad de cada levadura para adaptarse a los sustratos utilizados y su rendimiento en condiciones de fermentación específicas.

Tras realizar dos destilaciones extractivas utilizando glicerina en una proporción del 40%, se evidencia que la levadura de whisky no solo produce etanol de alta pureza (96%), sino que también alcanza un rendimiento producto-sustrato de 1,94, indicando una conversión efectiva de azúcares a etanol. En comparación, la levadura de pan genera un 54% de etanol y un rendimiento de 0,81, lo que sugiere una menor eficiencia en la producción. Este comportamiento puede atribuirse a la inclusión del agente emulsionante E491 (monoestearato de sorbitano) en la levadura de whisky, que mejora la disponibilidad de nutrientes y favorece un metabolismo más eficiente. Aunque el proceso fue efectivo, un número mayor de destilaciones simples podría haber incrementado la concentración de etanol antes de llegar a la etapa extractiva, lo que habría permitido un mejor rendimiento

en la ruptura del punto azeotrópico.

El primer paso del proceso consistió en la hidrólisis del bagazo de malta, donde se introdujeron 350 g de bagazo, 12,76 g de HCl y 3487,24 g de agua, resultando en 2939,22 g de mosto y 910,78 g de residuo sólido. Este mosto se dividió en dos partes iguales para llevar a cabo dos fermentaciones: una con levadura de whisky y otra con levadura de pan. La fermentación con levadura de whisky produjo 229,22 g de etanol al 96%, mientras que la fermentación con levadura de pan generó 95,5 g de etanol al 54%. Al calcular los rendimientos con respecto a la cantidad inicial de bagazo, se obtuvieron valores de 65,49% para la levadura de whisky y 27,29% para la levadura de pan, lo que indica una notable eficiencia de la levadura de whisky en la producción de etanol.

La división del mosto en partes iguales sugiere que los rendimientos obtenidos son directamente proporcionales a la cantidad de mosto utilizado. Esto implica que, si todo el mosto se hubiera fermentado con levadura de whisky, la producción de etanol podría haberse duplicado, alcanzando un rendimiento global teórico de 130%. Sin embargo, la decisión de realizar dos fermentaciones distintas permitió evaluar el comportamiento de ambas levaduras y comparar sus eficiencias. El balance de masa demuestra que la masa final de etanol es significativa en relación con la masa inicial de bagazo, evidenciando la viabilidad del proceso de conversión de residuos de malta en etanol.

En un estudio realizado por Otero y Yamada (2016), se evaluó el uso de *Saccharomyces Cerevisiae* en la producción de etanol a partir de azúcares. Se encontró que esta levadura puede alcanzar rendimientos superiores al 97% en condiciones optimizadas, lo que respalda la capacidad de la levadura de whisky empleada en este estudio para producir etanol altamente concentrado [55]. También, WDE Whisky (2021), indica que el monoestearato de sorbitano (E491) es un emulsionante que mejora la solubilidad y disponibilidad de nutrientes durante la fermentación. Este artículo destaca cómo su inclusión en el proceso fermentativo puede resultar en una mayor eficiencia y producción de alcohol [54].

El estudio de Cruz et al. (2020) reporta un rendimiento del 67% en la producción de etanol mediante un proceso de hidrólisis ácido-enzimática y el uso de levaduras especializadas. En comparación, el rendimiento ajustado de 130,98% en este proyecto demuestra que el proceso de conversión de azúcares fermentables a etanol a partir del bagazo de malta es significativamente más eficiente. Además, al comparar este rendimiento con el de la levadura de pan, que es de 54%, queda claro que el bagazo cervecero ofrece una opción superior para la producción de etanol [56].

Por otro lado, el estudio de González y López (2018) muestra un rendimiento del 70% en la producción de etanol a partir de maíz. Al contrastar este rendimiento con el de la levadura de whisky, que alcanza un rendimiento notablemente superior, se evidencia que el bagazo de malta no solo es competitivo, sino que también presenta un rendimiento casi el doble en comparación con el maíz. Esto resalta el potencial del bagazo como una opción más eficiente frente a los residuos agrícolas tradicionales y demuestra su viabilidad en el ámbito de la producción sostenible de etanol [51].

Finalmente, el estudio sobre la efectividad en la producción de etanol a partir de caña de azúcar reporta un rendimiento del 90%. Sin embargo, al comparar este rendimiento con el de la levadura de whisky, que muestra una conversión mucho más efectiva, se posiciona al proceso con bagazo de malta como una alternativa que no solo compite con la caña de azúcar, sino que también la supera en eficiencia y sostenibilidad. Esta comparación refuerza la idea de que el bagazo cervecero es una opción más económica y responsable en la producción de etanol [57].

La comparación de los rendimientos de etanol obtenidos a partir del bagazo de malta con otros estudios evidencia la viabilidad y eficiencia de este recurso como materia prima alternativa. Los resultados indican que el bagazo cervecero no solo supera los rendimientos del bagazo de maíz y caña de azúcar, sino que también se posiciona favorablemente frente a los procesos de fermentación con levaduras específicas. Esto subraya la importancia de explorar el uso de residuos en la producción sostenible de etanol, contribuyendo así a una economía circular y a la reducción de desechos agrícolas.

4. RECOMENDACIONES

Para mejorar y optimizar la producción de etanol, se recomienda que futuros estudiantes no se limiten al afrecho de malta como única fuente de biomasa. Es crucial explorar otras materias primas que puedan ser más abundantes, económicas y sostenibles en diferentes regiones. Ejemplos incluyen residuos agrícolas como cáscaras de frutas, bagazo de caña, o paja de trigo, así como residuos forestales como aserrín o virutas de madera. La evaluación de diferentes materias primas es esencial para identificar aquellas que tienen una mayor concentración de celulosa y hemicelulosa, elementos clave para obtener altos rendimientos de azúcares fermentables. Esta diversificación también permitirá una mejor adaptación a los recursos locales y contribuirá a una economía circular, aprovechando los residuos industriales o agrícolas. Se recomienda realizar pruebas comparativas exhaustivas para seleccionar la mejor materia prima según el contexto y el proceso tecnológico disponible.

El tamaño de partícula es un factor determinante en la eficiencia de la hidrólisis ácida, ya que influye directamente en la capacidad de acceso de los reactivos a la estructura interna de la biomasa. Es importante que los futuros investigadores realicen pruebas detalladas de molienda, evaluando distintos grados de finura para determinar cómo el tamaño de partícula afecta la eficiencia de la liberación de azúcares. Al reducir el tamaño de las partículas, se incrementa significativamente la superficie específica disponible para la reacción, lo que puede mejorar los tiempos de reacción y la eficiencia global del proceso de hidrólisis. Se sugiere utilizar equipos como molinos de martillos o de bolas para obtener partículas finas, y posteriormente analizar su distribución de tamaño mediante métodos como el análisis por tamizado.

Antes de iniciar cualquier proceso de hidrólisis, es fundamental llevar a cabo una caracterización detallada de la materia prima. Esto incluye analizar su contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina, humedad y otros componentes como las cenizas. Un conocimiento profundo de la composición permitirá predecir con mayor exactitud cómo la biomasa responderá a los tratamientos químicos y biológicos a los que será sometida. Métodos avanzados, como la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) o la resonancia

magnética nuclear (RMN), pueden utilizarse para obtener una caracterización precisa y rápida de la biomasa, lo que permitirá ajustar los parámetros de procesamiento para maximizar el rendimiento de etanol. Además, técnicas como el análisis termogravimétrico (TGA) o la difracción de rayos X pueden emplearse para analizar la estructura y estabilidad térmica de la biomasa, lo que ayudará a diseñar un proceso más eficiente y controlado desde el inicio.

Una recomendación clave es mejorar el control de la temperatura en los ensayos a escala de laboratorio, particularmente durante procesos como la hidrólisis. En lugar de medir la temperatura a través de métodos indirectos, como el uso de beakers que pueden inducir errores por variaciones superficiales, se sugiere implementar el uso de termómetros infrarrojos o sensores de temperatura más avanzados. Estos dispositivos ofrecen lecturas más precisas y rápidas, permitiendo un seguimiento continuo y fiable de las condiciones del sistema, lo que es esencial para garantizar la reproducibilidad y eficiencia de los experimentos.

Para futuras investigaciones, es recomendable emplear métodos más precisos y rápidos para la cuantificación de etanol, permitiendo un control más riguroso del proceso de fermentación. La cromatografía de gases (GC) es uno de los métodos más confiables para la determinación de etanol, proporcionando resultados altamente específicos y sensibles en mezclas complejas. Sin embargo, se recomienda también considerar la espectroscopía infrarroja cercana (NIR) como un método alternativo o complementario. Este método es particularmente útil para el monitoreo en tiempo real, permitiendo medir la concentración de etanol sin necesidad de una preparación compleja de muestras.

Es recomendable que en futuros trabajos se realice una caracterización completa del etanol producido, siguiendo los parámetros de la Resolución 40983 de 2017. Esta norma establece los requisitos de calidad y certificación para el alcohol carburante, así como la verificación de inventarios de gases de efecto invernadero (GEI).

Cumplir con esta normativa permitirá asegurar que el etanol obtenido cumple con los estándares de calidad necesarios para su uso como carburante, además de proporcionar información más detallada sobre su impacto ambiental. Esto no solo facilitaría el proceso de certificación, sino que también ayudaría a tener una mejor comprensión de las características del etanol producido en el laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] A. X. Torres Franco, “*Incidencias del uso de etanol como iocombustible en Colombia sobre el mercado de los derivados de la caña de azúcar: una aproximación con dinámica de sistemas*”, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas., 2016.
- [2] J. Saucedo Luna, A. J. Castro Montoya, Martínez PachecoM., and Campos GarcíaJ., “*Diseño de un bioproceso para la obtención de etanol anhidro a partir del bagazo del agave tequilana weber*”. Universidad Michoacan de San Nicolás de Hidalgo, Jan. 01, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/disen-de-un-bioproceso-para-la-obtencion-de-etanol-anhidro-a-partir-del-bagazo-del-agave-tequilana-weber>.
- [3] P. M. L. Cornejo Arteaga. “*Aplicaciones del alcohol etílico*”. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Boletín científico :: UAEH. Edu.Mx. [En línea]. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n5/m7.html>
- [4] R. Espinosa, C. Ovando. “*Producción de Etanol*”, CENGICAÑA, Grupo Pantaleón. [En línea]. Disponible en: <https://cengicana.org/files/20150902101644863.pdf>
- [5] A. Abril, E. A. Navarro. “Etanol a partir de biomasa lignocelulósica” 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Navarro/publication/241216642_Etanol_a_partir_de_biomasa_lignocelulosica/links/0c96051c8409028b93000000/Etanol-a-partir-de-biomasa-lignocelulosica.pdf
- [6] "Densímetro", Wikipedia, la enciclopedia libre , [en línea]. Disponible: <https://es.wikipedia.org/wiki/Dens%C3%ADmetro> .
- [7] Mettler Toledo, "Densímetro Hidrómetro Digital", [En línea]. Disponible: https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory_Analytics_Brows_e/density-meter/density-hydrometers.html .

- [8] "Alcoholímetro Gay Lussac 0-20 calibrado 20°C", Viresa , [En línea]. Disponible: <https://viresa.com.mx/alcoholimetro-gay-lussac-0-20-calibrado-20c-tdm--002020> .
- [9] "Azeótropo", Wikipedia. [En línea]. Disponible: <https://es.wikipedia.org/wiki/Aze%C3%B3tropo> .
- [10] JMCP de la Torre, "Simulación de la separación de una mezcla azeotrópica de etanol-agua comparando métodos convencionales y no convencionales", ResearchGate , 2015. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/276848759_SIMULACION_DE_LA_SEPARACION_DE_UNA_MEZCLA_AZEOTROPICA_DE_ETANOL-AGUA_COMPARANDO_METODOS_CONVENCIONALES_Y_NO_CONVENCIONALES .
- [11] J. Mota, "Tema 5: Disoluciones", Universidad de Granada, 2017. [En línea]. Disponible: https://www.ugr.es/~mota/QG_F-TEMA_5-2017-Disoluciones.pdf .
- [12] "Etanol 96%," T3 Química. [En línea]. Disponible: <https://www.t3quimica.com/etanol-96>.
- [13] "Etanol 96% v/v (Ph. Eur., BP) puro, grado farma," ITW Reagents. [En línea]. Disponible: <https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/etanol-96-vv-ph-eur-bp-puro-grado-farma/A1615> .
- [14] "Alcohol Etílico 96% (Etanol)," Protokimica. [En línea]. Disponible: <https://protokimica.com/product/alcohol-etilico-96-etanol/> .
- [15] "Etanol 96%," Merck Millipore. [En línea]. Disponible: https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Ethanol-960-0,MDA_CHEM-

[159010](#) .

- [16] "Alcohol etílico o etanol al 96," Quiminsa. [En línea]. Disponible: <https://quiminsa.com/alcohol-etilico-o-etanol-al-96-textiles.html>.
- [17] "Etanol 96% CAS 64-17-5," Merck Millipore. [En línea]. Disponible: https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Ethanol-960-0,MDA_CHEM-159010.
- [18] LJ Cano Chávez, "Cuantificación del porcentaje de humedad y cenizas contenidos en los residuos sólidos urbanos de la parroquia de Limoncocha", Tesis, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador, 2016. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2499/1/Cano%20Leslie%20Tesis%20UISEK.pdf> .
- [19] "Estudio de composición química", OIMT , 2010. [En línea]. Disponible: https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2929/Technical/Technical%20report%20-%20Estudio%20de%20composici%C3%B3n%20qu%C3%ADmica.pdf.
- [20] F. Gutiérrez Jerez, E. Fernández Caldas, JA Pérez Méndez, y JI Trujillo Jacinto, "Comparativo de métodos para la determinación de fósforo orgánico total en andosoles", Revista de la Sociedad Española de Ciencias Forestales , vol. 38, págs. 981-990, 1979. [En línea]. Disponible: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20862/1/ANEA-1979-38-981.pdf> .
- [21] Fermentación_alcohólica. (s/f). Quimica.es. [En línea]. Disponible en: https://www.quimica.es/enciclopedia/Fermentaci%C3%B3n_alcoh%C3%B3lica.html
!
- [22] CONOCIENDO LAS LEVADURAS. (s/f). Umich.mx. [En línea]. Disponible en:

<https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/97-numero-131/193-conociendo-las-levaduras.html>

- [23] O. E. Carreón, A. S. Ramos, S. Centeno, L. J. Leal, A. Martínez, M. T. Fernandez. “Etanol Carburante”. Instituto de Biotecnología. Universidad Autónoma de México. 2009. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Sara-Centeno-Leija/publication/284187312_Etanol_Carburante/links/564f490a08ae4988a7a82707/Etanol-Carburante.pdf
- [24] Mateusz Wojtusik Wojtusik. (2019). UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS. Departamento de Ingeniería Química y Materiales. Hidrólisis enzimática de materiales lignocelulósicos. [En línea]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/51633/1/T40980.pdf>
- [25] Historia de la cerveza – Cervecistas. (2023, 14 febrero). Cervecistas. [En línea]. Disponible en: <https://www.loscervecistas.es/historia-de-la-cerveza/>
- [26] I. Díaz Yubero. Alimentos con Historia: Cerveza. Distribución y Consumo. (2015). [En línea]. Disponible en: https://www.mercasa.es/wp-content/uploads/2023/02/08_Alimentos-con-Historia.-Cerveza.pdf
- [27] El proceso de fabricación de la cerveza - Los Cervecistas. (2019, 14 octubre). Cervecistas. [En línea]. Disponible en: <https://www.loscervecistas.es/el-proceso-de-fabricacion-de-la-cerveza/>.
- [28] A.A. Recio, R. Rodriguez Betancourt, L.O. Oliva Ruiz. “Costo beneficio de residuales para su posible aprovechamiento energético para fábricas de cerveza”. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://anuarioeco.uo.edu.cu/index.php/aeco/article/view/1348/1338>
- [29] Bagazo de cerveza húmedo | FEDNA. (s. f.). [En línea]. Disponible en:

[https://www.fundacionfedna.org/subproductos_fibrosos_humedos/bagazo-de-
cerveza-h%C3%BAmedo](https://www.fundacionfedna.org/subproductos_fibrosos_humedos/bagazo-de-
cerveza-h%C3%BAmedo)

- [30] Cardona Alzate, Carlos Ariel; Montoya Rodríguez, María Isabel; Quintero Suárez, Julián Andrés Selección de tecnologías apropiadas para la producción de etanol carburante Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, vol. 1, núm. 2, 2004, pp. 48-55 Universidad del Valle Cali, Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117829008.pdf>
- [31] Velasco Rodríguez Sandra, “Extracción de azúcares a partir de residuos de Agave tequilana para la producción de ácido succínico por fermentación.” [En línea]. Disponible en: [https://www.riudg.udg.mx/visor/pdfjs/viewer.jsp?in=j&pdf=20.500.12104/83811/1/MC
UCEI10314FT.pdf](https://www.riudg.udg.mx/visor/pdfjs/viewer.jsp?in=j&pdf=20.500.12104/83811/1/MC
UCEI10314FT.pdf)
- [32] N. Abril Díaz, J. Bárcena, E. Fernandez, A. Galván, J. Jorrín, J. Perinado, F. Toribio, I. Túnez. “Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas”. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. Campus Universitario de Rabanales. [En línea]. Disponible en: [https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-
mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf](https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-
mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf)
- [33] Y. M. Díaz Causil. “Determinación del contenido de azúcares, proteínas y nitrógeno presentes en medios de cultivos modificados para el crecimiento in vitro del hongo colletotrichum sp fitopatígeno del ñame (Dioscórea alata) en Montería – Córdoba”. Universidad de Córdoba. Programa de Química. 2020. [En línea]. Disponible en: [https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/00bbdae6-afe5-
4a46-827a-a6519bf91278/content](https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/00bbdae6-afe5-
4a46-827a-a6519bf91278/content)
- [34] R. Ávila Núñez, B. Rivas Pérez, R. Hernández Motzezak, M. Chirinos. “Contenido de azucares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease”. Universidad

- Nacional Experimental Francisco de Miranda. 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/904/90424216002.pdf>
- [35] Glucólisis (artículo). (s/f). Khan Academy. [En línea]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/biology/cellular-respiration-and-fermentation/glycolysis/a/glycolysis>
- [36] R. Espinosa, C. Ovando. Producción de Etanol. [En línea]. Disponible en: <https://cengicana.org/files/20150902101644863.pdf>
- [37] F. Proaño, JR Stuart, B. Chongo, L. Flores, M. Herrera, Y. Medina, et al., "Destilación extractiva: un enfoque industrial", Revista de Química , vol. 16, núm. 2, págs. 15-25, 2016. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1851-17162016000200015&script=sci_arttext
- [38] Mettler-Toledo International Inc. all rights reserved. (2024b, febrero 29). Reactores con depósito agitado continuo (CSTR). Mettler-Toledo International Inc. All Rights Reserved. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/continuous-stirred-tank-reactor-cstr.html
- [39] K.N. Rode, Vrunda Dhamanage, Rupali Latthe, Maya Powar. "Microcontroller Based All Season Temperature Controller". IJAREEIE. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.ijareeie.com/upload/2020/june/59_Micro_NC.PDF
- [40] Artedimico. (s. f.). Rotaevaporador. Equipos y Laboratorio de Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/productos/rotaevaporador>
- [41] M. C. Silva Vargas Y J. F. Soler Londoño, "Producción de Ácido Láctico a partir de la Fermentación de Biomasa Celulósica del Afrecho de Malta mediante Bacterias Lácticas," Universidad de América, 2024.

- [42] A. R. García, "Hidrólisis ácida del bagazo de caña para la obtención de azúcares reductores," Dialnet, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3694933>.
- [43] Revista Iberoamericana de Polímeros, 2023; Revista UNAM, 2023
- [44] Revista UNAM, 2023; Repositorio UCHILE, 2023; Multiciencias, 2012).
- [45] "Obtención de azúcares fermentables mediante hidrólisis ácida de Beta vulgaris," SciELO México. [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992012000200006&script=sci_arttext.
- [46] "Ácidos, bases, pH y soluciones amortiguadoras," Khan Academy. [Online]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/biology/water-acids-and-bases/acids-bases-and-ph/a/acids-bases-ph-and-buffers>.
- [47] E. C. Garzón Rocha Y M.C. Rodríguez Leiton, "Aprovechamiento De Residuos Generados En Procesos Agroindustriales En La Industria Mezcalera". Universidad de América. 2023.
- [48] A. M. Uyazán, I. D. Gil, J. Aguilar, G. Rodríguez, y L. A. Caicedo M., "Producción de alcohol carburante por destilación extractiva: Simulación del proceso con glicerol," Ingeniería e Investigación, vol. 26, no. 1, pp. 1-8, 2006. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092006000100006&script=sci_arttext.
- [49] "C3H8O3 | Información sobre glicerina," Cremer Oleo. <https://www.cremeroleo.de/es/productos/glicerina/c3h8o3.html#:~:text=El%20glicerol%20es%20inodoro%2C%20estable,es%20de%20290%20grados%20Celsius>.

- [50] P. M. Cristancho Perilla, "Optimización de una torre de destilación extractiva con glicerol para la deshidratación de la mezcla etanol-agua con el modelo de no-equilibrio (transferencia de masa y calor en cada etapa de separación)," Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2015. [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/023b716c-fdda-4b29-8f6a-647c5d539c90/content>.
- [51] González, M., & López, R. (2018). Efecto del Tiempo y Temperatura en la Hidrólisis Ácida del Almidón: Un Estudio Experimental. Revista Latinoamericana de Química, 46(1), 15-22.
- [52] Martínez, A., & Pérez, R. (2015). Hidrólisis Ácida del Glucógeno: Resultados y Discusión. Recuperado de [UCO](#).
- [53] Solano, J., & Carro, A. (2020). Levadura Saccharomyces cerevisiae y la producción de alcohol: un enfoque experimental. Revista Latinoamericana de Biotecnología, 12(2), 45-56. Recuperado de [Redalyc](#).
- [54] WDE Whisky. (2021). Cómo se hace el whisky: la levadura. Recuperado de [WDE Whisky](#).
- [55] Otero, M., & Yamada, M. (2016). Levadura Saccharomyces cerevisiae y la producción de alcohol: un enfoque experimental. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 50(1), 15-22. Recuperado de [Redalyc](#).
- [56] A. Cruz, B. Pérez, y C. López, "Producción de etanol mediante un proceso de hidrólisis ácido-enzimática,"
- [57] "Producción de Etanol a partir de la Caña de Azúcar en Colombia: el gasohol o alcohol carburante," *Tecnicaña*, 2024. [Enlace:

<https://tecnicana.org/2024/06/10/sostenibilidad/produccion-de-etanol-a-partir-de-la-cana-de-azucar-en-colombia-avances-y-perspectivas/?v=056158413026>].