



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO TÉCNICO DE CONVERSIÓN PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOETANOL A TRAVÉS DE BIOMASA AGRÍCOLA PARA
APLICACIÓN AUTOMOTRIZ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: JOSUÉ ALEJANDRO TENECELA PAUTA

ARIEL ALEXANDER CHACHO MUÑOZ

TUTOR: ING. CHRISTIAN OMAR PULLA MOROCHO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Josué Alejandro Tenecela Pauta con documento de identificación N° 0151094000 y Ariel Alexander Chacho Muñoz con documento de identificación N° 0151052818; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 04 de febrero del 2026

Atentamente,



Josué Alejandro Tenecela Pauta
0151094000



Ariel Alexander Chacho Muñoz
0151052818

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Josué Alejandro Tenecela Pauta con documento de identificación N° 0151094000 y Ariel Alexander Chacho Muñoz con documento de identificación N° 0151052818, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Desarrollo de un procedimiento técnico de conversión para la obtención de bioetanol a través de biomasa agrícola para aplicación automotriz”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 04 de febrero del 2026

Atentamente,



Josué Alejandro Tenecela Pauta

0151094000



Ariel Alexander Chacho Muñoz

0151052818

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Omar Pulla Morocho con documento de identificación N° 0103570602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO TÉCNICO DE CONVERSIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A TRAVÉS DE BIOMASA AGRÍCOLA PARA APLICACIÓN AUTOMOTRIZ**, realizado por Josué Alejandro Tenecela Pauta con documento de identificación N° 0151094000 y por Ariel Alexander Chacho Muñoz con documento de identificación N° 0151052818, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 04 de febrero del 2026

Atentamente,



Ing. Christian Omar Pulla Morocho, MSc.

0103570602

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto con todo mi cariño y gratitud a mis padres, Verónica Pauta y Patricio Tenecela, quienes han sido la base fundamental de mi formación personal y académica. Gracias por su respaldo constante y por los valores transmitidos desde el hogar y por la confianza que siempre han puesto en mí en cada etapa de este camino. Su esfuerzo, sacrificio y palabras de aliento me han servido motivación constante para no rendirme y perseverar aun frente a las circunstancias más difíciles.

Presento este trabajo con todo mi afecto, como expresión de mi permanente gratitud y de mi compromiso de hacerles sentir siempre profundamente orgullosos. A ustedes, con el corazón en la mano, les dedico este logro.

Finalmente, extendiendo este reconocimiento a todas las personas que, de una u otra manera, creyeron en mí durante este proceso. Familiares y amigos formaron parte fundamental de esta trayectoria, brindando apoyo constante y ánimo sincero. Este logro no es solo mío, también es de ustedes.

Josue Alejandro Tenecela Pauta

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, con profundo cariño y gratitud, a mis padres, Gloria Muñoz y Luis Chacho, así como a Freddy Muñoz, por haber sido pilares fundamentales en mi desarrollo personal y profesional. Agradezco profundamente el respaldo constante, los principios transmitidos desde el hogar y la confianza depositada en mí a lo largo de cada etapa de este proceso. Su esfuerzo, sacrificio y constantes palabras de aliento fueron la motivación necesaria para perseverar y superar los desafíos presentados en el camino.

De igual manera, dedico este logro a mis hermanos, quienes con su compañía y respaldo han sido parte importante de este recorrido. En especial, a mi hermano Ismael, quien ha sido un impulso permanente para seguir adelante, impulsándome a continuar con determinación hacia el cumplimiento de mis objetivos.

Asimismo, dedico este trabajo a la memoria de mi primo Kevin, quien en paz descansa. Su recuerdo permanece presente como un impulso significativo en mi vida y como un motivo

adicional para seguir adelante con responsabilidad y compromiso.

Les entrego este trabajo como muestra de mi sincera gratitud y como reflejo del compromiso permanente de honrar su apoyo y esfuerzo. Este logro es también de ustedes y representa mi deseo de hacerlos sentir siempre orgullosos.

Finalmente, extendiendo esta dedicatoria a todas las personas que, de una u otra manera, fueron parte de mi crecimiento personal y profesional en este camino. Su apoyo, confianza y palabras de aliento fueron fundamentales para alcanzar este logro.

Ariel Alexander Chacho Muñoz

AGRADECIMIENTO

Al concluir una de las fases más relevantes de mi formación universitaria, quiero manifestar mi profundo agradecimiento a cada una de las personas que fueron apoyo esencial durante este proceso. Este logro es el resultado del apoyo, la guía y el acompañamiento recibidos a lo largo de mi proceso de formación profesional.

Quiero expresar mi gratitud, antes que nada, a Dios, por otorgarme la fortaleza, la salud y la claridad necesarias para avanzar en cada etapa de este proyecto. Su presencia fue una guía constante en mi camino, permitiéndome mantener la constancia y la confianza para poder continuar.

Un reconocimiento especial al Ing. Christian Omar Pulla Morocho, M.Sc., tutor de esta tesis, por su orientación paciente, sus valiosas enseñanzas y su compromiso permanente durante el desarrollo de este trabajo. Asimismo, expreso mi agradecimiento a los docentes de la carrera, quienes a lo largo de mi formación universitaria compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo de manera significativa a mi desarrollo académico y profesional.

Mi profundo agradecimiento a mis padres, por el soporte logístico y emocional entregado durante toda mi etapa universitaria. Su comprensión, respaldo constante y motivación fueron esenciales para afrontar cada desafío y alcanzar esta meta académica.

Asimismo, agradezco a quien estuvo presente en el inicio de mi vida universitaria y fue parte del impulso inicial que me permitió dar los primeros pasos en este proceso de formación. Su acompañamiento en una etapa fundamental dejó una huella significativa en mi formación profesional.

Finalmente, agradezco a todas las personas que tuve la dicha de conocer durante mi carrera universitaria, quienes con su amistad, consejos y compañía hicieron de este camino una experiencia enriquecedora. Gracias por compartir no solo conocimientos, sino también momentos y vivencias que permanecerán siempre en mi memoria.

Josue Alejandro Tenecela Pauta

AGRADECIMIENTO

Al finalizar una de las fases más relevantes de mi trayectoria universitaria, deseo manifestar mi sincero agradecimiento a todas las personas que aportaron de forma significativa a este camino. La consecución de este objetivo ha sido posible gracias al respaldo permanente, la guía y el acompañamiento recibidos durante mi proceso de formación profesional...

De manera especial, deseo agradecer a Dios por brindarme la fortaleza, el bienestar y la lucidez necesarios para afrontar cada una de las etapas de este trabajo. Su acompañamiento permanente fue fundamental para conservar la constancia y la seguridad requeridas para continuar y alcanzar este objetivo.

Expreso un reconocimiento especial al Ing. Christian Omar Pulla Morocho, M.Sc., tutor de esta investigación, por su acompañamiento constante, su orientación oportuna y los valiosos conocimientos aportados durante el desarrollo de este trabajo. De igual manera, agradezco a los docentes de la carrera, quienes a lo largo de mi formación universitaria compartieron su experiencia y saber académico.

Expreso mi sincero reconocimiento a mis padres por el respaldo brindado, tanto en el ámbito logístico como emocional, a lo largo de esta etapa de formación. Su comprensión, apoyo permanente y estímulo constante fueron determinantes para enfrentar los desafíos presentados y alcanzar este objetivo.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todas las personas que participaron en este proceso, cuyo apoyo, compañerismo y orientación hicieron de esta etapa una experiencia valiosa y significativa.

Ariel Alexander Chacho Muñoz

RESUMEN

La alta dependencia energética de los combustibles fósiles y sus impactos ambientales han promovido la búsqueda de alternativas energéticas renovables para el sector automotriz. En este contexto, el bioetanol se presenta como un combustible viable debido a su origen renovable, alto número de octano y compatibilidad con motores de encendido por chispa. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un procedimiento técnico de conversión para la obtención de bioetanol a partir de biomasa agrícola, específicamente papa, yuca y caña de azúcar, y evaluar su potencial aplicación automotriz.

La investigación se desarrolló a nivel de laboratorio mediante una metodología experimental que incluyó la preparación y acondicionamiento de la biomasa, procesos de maceración enzimática para biomásas ricas en almidón, fermentación alcohólica controlada y destilación sucesiva para incrementar la concentración alcohólica del producto obtenido. El bioetanol producido fue caracterizado a través de análisis fisicoquímicos utilizando un analizador ERASPEC FTIR Fuel, permitiendo determinar parámetros relevantes como contenido de etanol, densidad, contenido de agua y números de octano RON y MON.

El bioetanol obtenido fue evaluado en un motor de combustión interna con sistema de encendido por chispa, tanto en estado puro como en mezclas con gasolina, analizando el arranque, la estabilidad en ralentí y el funcionamiento general. Los ensayos demostraron que el bioetanol producido a partir de caña de azúcar presentó las mejores propiedades fisicoquímicas y el desempeño más favorable, con mayor estabilidad operativa y mejor respuesta al encendido. En cambio, los bioetanoles de papa y yuca mostraron un potencial técnico condicionado a mejoras en los procesos de purificación, principalmente en la reducción del contenido de agua.

Finalmente, el estudio concluye que la biomasa agrícola local constituye una alternativa viable para la producción de bioetanol a pequeña escala y que, bajo un procedimiento técnico adecuado, el bioetanol de caña de azúcar presenta mayor viabilidad para su aplicación automotriz, contribuyendo al desarrollo de combustibles renovables y al fortalecimiento de la matriz energética sostenible en el Ecuador.

Palabras clave: *Bioetanol, biomasa agrícola, fermentación alcohólica, destilación, combustibles alternativos, aplicación automotriz, motor de combustión interna.*

ABSTRACT

The growing dependence on fossil-based fuels, along with their environmental consequences, has led to an increased interest in renewable energy alternatives for the automotive sector. In this context, bioethanol emerges as a promising fuel due to its renewable origin, high octane rating, and compatibility with spark-ignition internal combustion engines. This study aims to develop a technical conversion procedure for bioethanol production from agricultural biomass—specifically potato, cassava, and sugarcane—and to evaluate its potential automotive application.

The study was carried out at a laboratory scale through an experimental approach that included biomass preparation and conditioning, enzymatic maceration for starch-rich feedstocks, controlled alcoholic fermentation, and successive distillation stages to increase ethanol concentration. The produced bioethanol was characterized through physicochemical analyses using an ERASPEC FTIR Fuel analyzer, allowing the determination of key parameters such as ethanol content, density, water content, and octane numbers (RON and MON). Additionally, FTIR spectroscopic analysis was performed to confirm the presence of functional groups characteristic of ethanol.

The bioethanol samples were subsequently tested in a spark-ignition internal combustion engine, both in pure form and blended with gasoline, assessing start-up behavior, idle stability, and overall engine performance. Experimental results indicated that sugarcane-derived bioethanol exhibited superior physicochemical properties and the most favorable engine performance, with enhanced operational stability and improved ignition response. Conversely, bioethanol obtained from potato and cassava showed technical potential conditioned by the need for improved purification processes, particularly in reducing water content.

The study concludes that locally available agricultural biomass represents a viable option for small-scale bioethanol production and that, under an appropriate technical procedure, sugarcane bioethanol demonstrates the highest feasibility for automotive applications, thereby supporting the development of renewable fuels and the reinforcement of a sustainable energy matrix in Ecuador.

Keywords: *Bioethanol, agricultural biomass, alcoholic fermentation, distillation, alternative fuels, automotive application, internal combustion engine.*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|---------|
| RESUMEN | XII |
| ABSTRACT..... | XIII |
| ÍNDICE GENERAL | XIV |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XXIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XXX |
| ÍNDICE DE ANEXOS | XXXII |
| INTRODUCCIÓN | XXXIII |
| PROBLEMA DE ESTUDIO | XXXIV |
| Antecedentes | XXXIV |
| Importancia y Alcances..... | XXXV |
| Delimitación..... | XXXVI |
| OBJETIVOS | XXXVIII |
| OBJETIVO GENERAL..... | XXXVIII |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | XXXVIII |
| 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL | 1 |
| 1.1 Energías renovables y biocombustibles | 1 |
| 1.1.1 Problemática energética y ambiental | 1 |
| 1.1.2 Energías renovables: concepto y clasificación | 1 |
| 1.1.3 Importancia de los biocombustibles en el sector automotriz | 2 |
| 1.2 Clasificación de los biocombustibles..... | 3 |
| 1.2.1 Biocombustibles de origen primario..... | 4 |
| 1.2.2 Biocombustibles de segunda etapa | 5 |
| 1.2.3 Biocombustibles de generación avanzada | 6 |
| 1.3 Bioetanol como combustible renovable..... | 7 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.3.1 | Definición y estructura química del bioetanol | 8 |
| 1.3.2 | Propiedades físicas y químicas del bioetanol..... | 8 |
| 1.3.3 | Poder calorífico y número de octano | 9 |
| 1.3.4 | Bioetanol frente a la gasolina convencional | 9 |
| 1.4 | Biomasa agrícola como materia prima para la obtención de bioetanol | 9 |
| 1.4.1 | Definición de biomasa agrícola | 10 |
| 1.4.2 | Biomasa con alto contenido de azúcares y almidón | 11 |
| 1.4.3 | Importancia de la biomasa agrícola en el Ecuador | 11 |
| 1.5 | Materias primas de origen agrícola empleadas en la producción de bioetanol..... | 12 |
| 1.5.1 | Caña de azúcar | 12 |
| 1.5.2 | Yuca | 13 |
| 1.5.3 | Papa..... | 14 |
| 1.6 | Etapas generales para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola | 15 |
| 1.6.1 | Fermentación alcohólica | 15 |
| 1.6.2 | Destilación del bioetanol..... | 15 |
| 1.6.3 | Limitaciones del proceso de destilación | 16 |
| 1.7 | Normativa técnica aplicada al bioetanol combustible | 17 |
| 1.7.1 | Norma ASTM D4806 | 17 |
| 1.7.2 | Norma NTE INEN 2478 | 18 |
| 1.7.3 | Importancia de la normalización del bioetanol para uso automotriz ... | 19 |
| 1.8 | Antecedentes y estudios previos | 20 |
| 1.8.1 | Investigaciones internacionales | 20 |
| 1.8.2 | Investigaciones nacionales..... | 20 |
| 1.8.3 | Análisis crítico de investigaciones previas | 21 |

| | |
|---|----|
| 2. DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO TÉCNICO DE CONVERSIÓN DE BIOMASA AGRÍCOLA A BIOETANOL | 22 |
| 2.1 Introducción al procedimiento técnico de conversión de biomasa agrícola | 22 |
| 2.2 Selección y caracterización de las biomosas agrícolas | 22 |
| 2.2.1 Criterios de selección de biomosas | 23 |
| 2.2.2 Criterios de selección de biomosas | 23 |
| 2.2.3 Clasificación de las biomosas según su composición..... | 25 |
| 2.3 Esquema general del procedimiento de conversión..... | 26 |
| 2.4 Preparación de la biomasa agrícola..... | 28 |
| 2.4.1 Obtención y acondicionamiento de la biomasa | 28 |
| 2.4.2 Preparación de biomosas ricas en almidón (papa y yuca)..... | 30 |
| 2.4.3 Preparación de biomasa de alto contenido en azúcares simples (caña de azúcar)..... | 32 |
| 2.5 Trituración, obtención y pesaje del sustrato | 33 |
| 2.5.1 Obtención y pesaje de “puré” de papa | 33 |
| 2.5.2 Obtención y pesaje de “puré” de yuca | 36 |
| 2.6 Proceso de macerado enzimático (papa y yuca) | 37 |
| 2.6.1 Principio del macerado enzimático (papa y yuca) | 38 |
| 2.6.2 Cálculo de la cantidad de malta de cebada a adicionar..... | 39 |
| 2.6.3 Control de variables del macerado..... | 43 |
| 2.7 Filtrado y obtención del mosto | 46 |
| 2.7.1 Separación sólido-líquido..... | 47 |
| 2.7.2 Características del mosto obtenido | 48 |
| 2.8 Desinfección del mosto y de la instrumentación | 49 |
| 2.8.1 Importancia del control microbiológico..... | 50 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.8.2 | Desinfección del mosto mediante ebullición | 50 |
| 2.8.3 | Desinfección de equipos y recipiente | 51 |
| 2.9 | Preparación del proceso de fermentación | 51 |
| 2.9.1 | Selección de la levadura..... | 52 |
| 2.9.2 | Preparación del starter..... | 54 |
| 2.10 | Fermentación alcohólica del mosto | 54 |
| 2.10.1 | Inoculación del mosto | 55 |
| 2.10.2 | Condiciones de fermentación..... | 55 |
| 2.11 | Consideraciones del proceso de fermentación según biomasa | 58 |
| 2.12 | Cierre de la etapa de fermentación..... | 59 |
| 2.13 | Proceso de destilación del fermentado..... | 59 |
| 2.14 | Principio de la destilación alcohólica | 60 |
| 2.15 | Tipo de destilación empleada..... | 60 |
| 2.16 | Destilación del fermentado por tipo de biomasa..... | 61 |
| 2.16.1 | Destilación del fermentado de biomasa 1: [Papa]..... | 61 |
| 2.16.2 | Destilación del fermentado de biomasa 2: [Caña de azúcar] | 62 |
| 2.16.3 | Destilación del fermentado de biomasa 3: [Yuca] | 62 |
| 2.17 | Equipo de destilación empleado | 62 |
| 2.17.1 | Sistema de condensación | 64 |
| 2.18 | Control de temperatura durante la destilación | 65 |
| 2.19 | Procedimiento general de destilación | 66 |
| 2.20 | Recolección del destilado | 67 |
| 2.21 | Repetición del proceso de destilado..... | 68 |
| 2.22 | Destilación del fermentado de papa..... | 69 |
| 2.22.1 | Preparación y carga del fermentado en el destilador | 69 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.22.2 | Primera destilación del fermentado de papa | 69 |
| 2.22.3 | Segunda destilación de la papa | 73 |
| 2.22.4 | Tercera destilación de la papa..... | 76 |
| 2.22.5 | Tabla resumen de las destilaciones de la biomasa de papa..... | 79 |
| 2.23 | Destilación del mosto fermentado de caña de azúcar | 79 |
| 2.23.1 | Primera destilación del fermentado de caña de azúcar | 80 |
| 2.23.2 | Segunda destilación de caña de azúcar | 83 |
| 2.23.3 | Tercera destilación de caña de azúcar..... | 85 |
| 2.23.4 | Tabla resumen de las destilaciones de la biomasa de caña de azúcar...88 | |
| 2.24 | Destilación del fermentado de la yuca | 88 |
| 2.24.1 | Primera destilación del fermentado de la yuca | 89 |
| 2.24.2 | Segunda destilación del fermentado de yuca | 92 |
| 2.24.3 | Tercera destilación del fermentado de la yuca..... | 94 |
| 2.24.4 | Tabla resumen de las destilaciones de la biomasa de la yuca..... | 97 |
| 2.25 | Cierre de la etapa de destilación | 97 |
| 3. ANÁLISIS COMPARATIVO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL BIOETANOL | | |
| OBTENIDO | | 99 |
| 3. 1 | Enfoque general del capítulo | 99 |
| 3.2 | Equipos de laboratorio utilizados para la caracterización del bioetanol..... | 99 |
| 3.2.1 | Descripción general del laboratorio | 99 |
| 3.2.2 | Equipos empleados para la medición de propiedades..... | 100 |
| 3.3 | Procedimiento general de análisis de las muestras | 102 |
| 3.3.1 | Encendido del equipo..... | 103 |
| 3.3.2 | Selección del tipo de combustible e ingreso de datos de referencia..... | 103 |
| 3.3.3 | Colocación de la muestra y ejecución del análisis..... | 104 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.3.4 | Visualización de resultados..... | 105 |
| 3.3.5 | Exportación de datos..... | 105 |
| 3.4 | Propiedades medidas por el equipo ERASPEC FTIR Fuel | 106 |
| 3.4.1 | Parámetros obtenidos en el modo <i>Ethanol</i> | 106 |
| 3.4.2 | Parámetros obtenidos en el modo <i>Gasoline</i> | 106 |
| 3.4.3 | Justificación del uso de ambos modos de medición (Ethanol & Gasoline) | 107 |
| 3.5 | Resultados experimentales obtenidos a partir de muestras puras de cada biomasa 107 | |
| 3.5.1 | Resultados del bioetanol obtenido a partir de papa | 108 |
| 3.5.2 | Resultados del bioetanol obtenido a partir de yuca | 109 |
| 3.5.3 | Resultados del bioetanol producido a partir de caña de azúcar | 110 |
| 3.6 | Comparación general de los resultados experimentales | 111 |
| 3.6.1 | Comparación de parámetros clave | 111 |
| 3.6.2 | Análisis comparativo entre biomosas..... | 111 |
| 3.6.3 | Observaciones relevantes..... | 112 |
| 3.7 | Análisis espectroscópico infrarrojo (FTIR) del bioetanol obtenido | 112 |
| 3.7.1 | Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de papa | 112 |
| 3.7.2 | Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de yuca | 114 |
| 3.7.3 | Espectro FTIR del bioetanol producido a partir de caña de azúcar | 115 |
| 3.8 | Prueba experimental en un motor MEP utilizando el bioetanol obtenido puro... 116 | |
| 3.8.1 | Descripción del motor..... | 116 |
| 3.8.2 | Criterios de evaluación | 118 |
| 3.8.3 | Resultados de primer encendido y observaciones experimentales | 118 |
| 3.9 | Preparación de mezclas bioetanol–gasolina para pruebas en motor | 120 |

| | |
|--|-----|
| 3.9.1 Preparación de la mezcla de bioetanol con gasolina a partir de caña de azúcar | 120 |
| 3.9.2 Preparación de la mezcla de bioetanol con gasolina a partir de papa... | 121 |
| 3.9.3 Preparación de la mezcla de bioetanol con gasolina a partir de yuca... | 121 |
| 3.9.4 Tabla resumen de las mezclas bioetanol–gasolinas preparadas..... | 121 |
| 3.10 Análisis de las mezclas bioetanol–gasolina mediante ERASPEC FTIR Fuel ... | 122 |
| 3.10.1 Resultados de la mezcla E80 (bioetanol con gasolina a partir de caña de azúcar)..... | 122 |
| 3.10.2 Resultados de la mezcla E65 (bioetanol con gasolina a partir de papa) | 123 |
| 3.10.3 Resultados de la mezcla E60 (bioetanol con gasolina a partir de yuca) | 124 |
| 3.10.4 Análisis comparativo entre bioetanol puro y mezclas (gráficas). | 124 |
| 3.10.5 Comparación del número de octano (RON y MON) del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina | 125 |
| 3.10.6 Comparación del contenido de agua del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina | 126 |
| 3.10.7 Comparación del contenido de etanol del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina | 127 |
| 3.10.8 Comparación de la densidad del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina | 128 |
| 3.11 Prueba experimental en un motor MEP utilizando mezclas bioetanol con gasolina... .. | 129 |
| 3.11.1 Condiciones iniciales del motor..... | 129 |
| 3.11.2 Carga del combustible..... | 129 |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| 3.11.3 | Secuencia de pruebas experimentales | 130 |
| 3.12 | Resultados experimentales de funcionamiento del motor | 131 |
| 3.13 | Análisis comparativo del desempeño en el motor | 131 |
| 3.14 | Desempeño del motor con mezcla de bioetanol de caña de azúcar con gasolina..... | 132 |
| 3.14.1 | Comportamiento de arranque del motor durante el encendido | 132 |
| 3.14.2 | Estabilidad en régimen de ralentí..... | 132 |
| 3.14.3 | Análisis comparativo del desempeño en el motor | 132 |
| 3.15 | Desempeño del motor con mezcla de bioetanol de papa con gasolina | 133 |
| 3.15.1 | Comportamiento de arranque del motor durante el encendido | 133 |
| 3.15.2 | Estabilidad en régimen de ralentí..... | 133 |
| 3.15.3 | Regularidad del régimen de giro y observaciones generales | 133 |
| 3.16 | Desempeño del motor con mezcla de bioetanol de yuca con gasolina..... | 134 |
| 3.16.1 | Comportamiento de arranque del motor durante el encendido | 134 |
| 3.16.2 | Estabilidad en régimen de ralentí..... | 134 |
| 3.16.3 | Regularidad del régimen de giro y observaciones generales | 135 |
| 3.17 | Comparación global del desempeño del motor..... | 135 |
| 3.18 | Discusión de resultados..... | 137 |
| 3.18.1 | Discusión de los resultados fisicoquímicos del bioetanol..... | 137 |
| 3.18.2 | Relación entre la calidad del bioetanol y el comportamiento del motor | 137 |
| 3.18.3 | Implicaciones de los resultados para el uso de bioetanol | 138 |
| CONCLUSIONES | | 139 |
| RECOMENDACIONES..... | | 141 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 143 |

ANEXOS 147

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-------|
| Figura 1 Ubicación del proyecto en Cuenca y zona de intervención..... | XXXVI |
| Figura 2 Esquema general de las fuentes de energía renovable. | 1 |
| Figura 3 Integración de rutas hidrotérmicas y bioquímicas para conversión de biomasa en biocombustibles. | 2 |
| Figura 4 Biomasa como fuente de biocombustibles de primera, segunda y tercera generación. | 4 |
| Figura 5 Etapas de transformación de la caña de azúcar en biocombustible..... | 5 |
| Figura 6 Diagrama del proceso de gestión de residuos biomásicos a través de carbonización hidrotermal dentro de un enfoque de economía circular. | 6 |
| Figura 7 Diagrama simplificado de la aplicación de las microalgas en la producción de combustibles alternativos..... | 7 |
| Figura 8 Ejemplo de biomasa agrícola, papa superchola utilizada como insumo para la obtención de bioetanol. | 10 |
| Figura 9 Producción agrícola de caña de azúcar..... | 12 |
| Figura 10 Biomasa agrícola - yuca | 13 |
| Figura 11 Cultivo de papa..... | 14 |
| Figura 12 Esquema general del proceso de fermentación alcohólica aplicado a la producción de bioetanol..... | 16 |
| Figura 13 Papa superchola usada como biomasa agrícola..... | 24 |
| Figura 14 Preparación de la yuca como insumo para la producción de bioetanol..... | 24 |
| Figura 15 Acondicionamiento de la caña de azúcar para su uso como biomasa agrícola | 25 |
| Figura 16 Diagrama de flujo del procedimiento técnico para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola..... | 27 |
| Figura 17 Lavado y limpieza inicial de la papa como biomasa agrícola..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 Lavado y limpieza inicial de la yuca como biomasa agrícola..... | 29 |
| Figura 19 Biomasa de caña de azúcar previamente lavada para su proceso de extracción de pulpa..... | 30 |
| Figura 20 Etapa de cocción de la papa. | 31 |
| Figura 21 Etapa de cocción de la yuca. | 31 |
| Figura 22 Extracción de jugo de caña de azúcar | 32 |
| Figura 23 Proceso de hervido de la pulpa de la caña de azúcar..... | 33 |
| Figura 24 Trituración de la papa cocida mediante broca mezcladora acoplada a taladro eléctrico..... | 34 |
| Figura 25 Pesaje del pure de papa obtenido | 35 |
| Figura 26 Visualización de peso en balanza del pure obtenido de la papa previo a la maceración | 35 |
| Figura 27 Trituración de la yuca cocida mediante broca mezcladora acoplada a taladro eléctrico..... | 36 |
| Figura 28 Pesaje del pure obtenido de la yuca previo a la maceración | 37 |
| Figura 29 Malta de cebada usada para el proceso de macerado | 38 |
| Figura 30 Proceso de triturado de malta de cebada para proceso de macerado..... | 39 |
| Figura 31 Pesaje de 2,55 kg de malta de cebada calculados como el 15 % del puré de papa.40 | |
| Figura 32 Adición gradual de la malta de cebada al puré de papa con agitación manual | 41 |
| Figura 33 Pesaje de 2.1 kg de malta de cebada calculados como el 15 % del puré de yuca. .42 | |
| Figura 34 Adición progresiva de la malta de cebada al puré de yuca con agitación manual. 43 | |
| Figura 35 Control térmico del puré de papa durante el proceso de maceración..... | 44 |
| Figura 36 Control térmico del puré de yuca durante el proceso de maceración..... | 44 |
| Figura 37 Estado final del sistema al término del macerado de la papa. | 46 |
| Figura 38 Estado final del sistema al término del macerado de la yuca. | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 39 Proceso de filtrado del mosto de papa del sistema mediante colador. | 47 |
| Figura 40 Proceso de filtrado del mosto de yuca del sistema mediante colador. | 48 |
| Figura 41 Muestra de mosto de papa obtenido tras el proceso de filtrado. | 49 |
| Figura 42 Muestra de mosto de yuca obtenido tras el proceso de filtrado. | 49 |
| Figura 43 Agitación del fermentador con ácido desinfectante dentro. | 51 |
| Figura 44 Pesaje de la levadura empleada para la fermentación del mosto de papa, correspondiente a una masa de 20 g. | 52 |
| Figura 45 Pesaje de la levadura empleada para la fermentación del mosto de caña de azúcar, correspondiente a una masa de 30 g. | 53 |
| Figura 46 Pesaje de la levadura empleada para la fermentación del mosto de yuca, correspondiente a una masa de 20 g. | 53 |
| Figura 47 Preparación del starter de levadura previo a la etapa de fermentación. | 54 |
| Figura 48 Introducción del starter de levadura al mosto como inicio del proceso de fermentación alcohólica. | 55 |
| Figura 49 Fermentador equipado con airlock utilizado durante la fermentación del mosto de papa..... | 56 |
| Figura 50 Fermentador equipado con airlock utilizado durante la fermentación del mosto de caña de azúcar..... | 57 |
| Figura 51 Fermentador equipado con airlock utilizado durante la fermentación del mosto de yuca..... | 57 |
| Figura 52 Ejemplo instrumentación de destilación industrial | 60 |
| Figura 53 Proceso de destilación por tandas..... | 61 |
| Figura 54 Destilador artesanal utilizado en el proceso de destilación..... | 63 |
| Figura 55 Sistema de condensación mediante serpentín de cobre..... | 64 |
| Figura 56 Monitoreo de la temperatura durante la destilación del fermentado..... | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 57 Visualización de carga del fermentado en la olla destiladora. | 67 |
| Figura 58 Recolección del destilado durante el proceso de destilación. | 68 |
| Figura 59 Proceso de destilación del fermentado de papa. | 70 |
| Figura 60 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la primera destilación de papa. | 71 |
| Figura 61 Gráfica de conversión densidad–concentración de alcohol etílico. | 72 |
| Figura 62 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Papa – Primera destilación | 72 |
| Figura 63 Carga del destilado en el equipo para segunda destilación. | 74 |
| Figura 64 Recolección del segundo destilado..... | 74 |
| Figura 65 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la segunda destilación de papa | 75 |
| Figura 66 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Papa – Segunda destilación | 76 |
| Figura 67 Cantidad de destilado obtenido tras tercera destilación de papa | 77 |
| Figura 68 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la tercera destilación de papa. | 78 |
| Figura 69 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Papa – Tercera destilación..... | 78 |
| Figura 70 Proceso de destilación del fermentado de caña de azúcar | 80 |
| Figura 71 Cantidad de destilado obtenido tras primera destilación de caña de azúcar | 81 |
| Figura 72 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la primera destilación de caña de azúcar. | 82 |
| Figura 73 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Caña de azúcar – Primera destilación..... | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 74 Cantidad de destilado obtenido tras segunda destilación de caña de azúcar..... | 83 |
| Figura 75 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la segunda destilación de caña de azúcar | 84 |
| Figura 76 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Caña de azúcar – Segunda destilación..... | 85 |
| Figura 77 Cantidad de destilado obtenido tras tercera destilación de caña de azúcar | 86 |
| Figura 78 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la tercera destilación de caña de azúcar. | 87 |
| Figura 79 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Caña de azúcar – Tercera destilación | 87 |
| Figura 80 Proceso de destilación del fermentado de la yuca. | 89 |
| Figura 81 Cantidad de destilado obtenido tras primera destilación de fermentado de yuca. . | 90 |
| Figura 82 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la primera destilación de yuca | 91 |
| Figura 83 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Yuca – Primera destilación..... | 91 |
| Figura 84 Cantidad de destilado obtenido tras segunda destilación de yuca..... | 92 |
| Figura 85 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la segunda destilación de yuca | 93 |
| Figura 86 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Yuca – Segunda destilación..... | 94 |
| Figura 87 Cantidad de destilado obtenido tras tercera destilación de yuca. | 95 |
| Figura 88 Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la tercera destilación de yuca | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figura 89 Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Yuca – Tercera destilación. | 96 |
| Figura 90 Vista general del Laboratorio de Tribología de la Universidad Politécnica Salesiana. | 100 |
| Figura 91 Vista frontal del analizador ERASPEC FTIR Fuel. | 101 |
| Figura 92 Equipo encendido. | 103 |
| Figura 93 Selección del tipo de combustible. | 103 |
| Figura 94 Ingreso de datos. | 104 |
| Figura 95 Probeta y manguera de succión del equipo. | 104 |
| Figura 96 Visualización general de datos en el software Erasoft RCS. | 105 |
| Figura 97 Visualización de los datos obtenidos en la computadora mediante Excel. | 105 |
| Figura 98 Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de papa. | 113 |
| Figura 99 Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de yuca. | 114 |
| Figura 100 Espectro FTIR del bioetanol producido a partir de caña de azúcar. | 115 |
| Figura 101 Maqueta didáctica del motor funcional utilizada en las pruebas experimentales. | 117 |
| Figura 102 Vaciado completo del tanque de combustible previo al uso de bioetanol puro. | 119 |
| Figura 103 Comparación de los valores de RON y MON del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina. | 125 |
| Figura 104 Comparación de los valores de RON y MON del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina. | 126 |
| Figura 105 Comparación del contenido de etanol del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina. | 127 |
| Figura 106 Comparación de la densidad del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina. | 128 |

| | |
|--|-----|
| Figura 107 Medición volumétrica, preparación y carga de mezclas bioetanol–gasolina en el motor..... | 130 |
| Figura 108 Motor en funcionamiento en régimen de ralentí durante la prueba experimental. | 131 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1 Comparación general entre etanol y bioetanol..... | 3 |
| Tabla 2 Principales limitaciones del proceso de destilación aplicado a la producción de bioetanol..... | 17 |
| Tabla 3 Principales propiedades físico-químicas del etanol combustible según ASTM D4806 | 18 |
| Tabla 4 Principales requisitos físico-químicos del etanol combustible según la norma NTE INEN 2478 | 19 |
| Tabla 5 Clasificación de las biomásas agrícolas según su composición y tratamiento previo | 26 |
| Tabla 6 Cantidades iniciales de biomasa agrícola empleadas en el procedimiento..... | 30 |
| Tabla 7 Registro de volumen de mosto obtenido tras el filtrado | 48 |
| Tabla 8 Etapas del proceso de destilación y condiciones operativas | 66 |
| Tabla 9 Resumen de las destilaciones del bioetanol obtenido a partir de papa | 79 |
| Tabla 10 Resumen de las destilaciones del bioetanol producido a partir de la caña de azúcar. | 88 |
| Tabla 11 Resumen de las destilaciones del bioetanol producido a partir de la yuca | 97 |
| Tabla 12 Resumen final de la obtención de bioetanol por biomasa..... | 98 |
| Tabla 13 Especificaciones generales del analizador ERASPEC Fuel. | 102 |
| Tabla 14 Resultados del análisis del bioetanol de papa | 108 |
| Tabla 15 Resultados del análisis del bioetanol de yuca | 109 |
| Tabla 16 Resultados del análisis del bioetanol de caña de azúcar | 110 |
| Tabla 17 Comparación de parámetros clave del bioetanol obtenido | 111 |
| Tabla 18 Características técnicas del motor Hyundai NEW EF Sonata 2.0 | 117 |
| Tabla 19 Resumen de mezclas de bioetanol-gasolina empleadas en las pruebas experimentales de encendido en motor..... | 122 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 20 Propiedades fisicoquímicas de la mezcla E80 (bioetanol–gasolina a partir de caña de azúcar)..... | 123 |
| Tabla 21 Propiedades fisicoquímicas de la mezcla E65 (bioetanol–gasolina a partir de papa)..... | 123 |
| Tabla 22 Propiedades fisicoquímicas de la mezcla E60 (bioetanol–gasolina a partir de yuca) | 124 |
| Tabla 23 Comparación global del desempeño del motor según la biomasa utilizada. | 135 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo 1 Fabricación del serpentín de cobre utilizado en el condensador de la olla destiladora. | 147 |
| Anexo 2 Carga del bioetanol en el tanque del sistema de alimentación para la prueba de funcionamiento del motor. | 147 |
| Anexo 3 Equipo ERASPEC FTIR Fuel utilizado para la caracterización fisicoquímica del bioetanol..... | 148 |
| Anexo 4 Adecuación de la tapa de la olla destiladora para la instalación de termómetro y salida de vapor hacia el sistema de condensación. | 148 |
| Anexo 5 Uso de equipo de protección personal (mandil de laboratorio) durante el análisis de muestras de bioetanol..... | 149 |

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética y la volatilidad en los precios de los combustibles de origen fósil han incrementado el interés por alternativas renovables que permitan reducir la dependencia del petróleo y mitigar los impactos ambientales derivados del transporte. En este contexto, los biocombustibles han adquirido relevancia mundial por su capacidad de generar energía a partir de recursos renovables, mejorar la seguridad energética y disminuir las emisiones contaminantes. Entre ellos, el bioetanol destaca como un combustible estratégico, debido a su alto octanaje, su capacidad de mezcla con gasolina y su potencial para contribuir a el cambio progresivo hacia sistemas de movilidad más sostenibles.

La producción de bioetanol en países con amplia disponibilidad agrícola constituye una opción viable para la diversificación de la matriz energética y fomentar la economía circular. En Ecuador, cultivos como la papa, la yuca y la caña de azúcar representan fuentes accesibles de biomasa que pueden ser transformadas mediante procesos biotecnológicos como la fermentación y la destilación. Sin embargo, a pesar del potencial de estas materias primas, aún es limitado el desarrollo de procedimientos técnicos estandarizados que permitan obtener un bioetanol de calidad adecuada para su uso automotriz, conforme a requisitos de pureza establecidos por normativas como la NTE INEN 2478 y la ASTM D4806.

La ingeniería automotriz requiere biocombustibles que aseguren un correcto desempeño en motores de combustión interna, manteniendo parámetros de funcionamiento estables y emisiones controladas. Por ello, resulta fundamental no solo producir bioetanol, sino también caracterizarlo, compararlo y validar su comportamiento dentro de un motor real. Este proceso permite determinar la viabilidad técnica del biocombustible y evaluar su impacto en parámetros como la capacidad de ignición, la combustión y el funcionamiento básico del motor.

En este marco, el presente trabajo desarrolla un procedimiento técnico para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola, evaluando sus propiedades fisicoquímicas y su desempeño automotriz. A través de una metodología que integra investigación bibliográfica, experimentación en laboratorio y análisis comparativo, se busca generar información confiable que fortalezca el uso de biocombustibles locales como alternativa energética sostenible para el país.

PROBLEMA DE ESTUDIO

Los precios de los combustibles son continuos en los últimos años en el Ecuador. Desde el 12 de octubre de 2025, el galón de gasolina extra y Ecopaís se eleva a \$2,911, mientras que el diésel se mantiene en \$2,80 por galón (Erazo, 2025). Este aumento constante impacta directamente en los costos del transporte y de producción, perjudicando especialmente a las zonas rurales y en los pequeños productores agrícolas. Ante esta situación, surge la necesidad de explorar alternativas energéticas locales y sostenibles. La obtención de bioetanol a partir de la biomasa agrícola local y renovable, como la papa, caña de azúcar y yuca, se vuelve una opción prometedora. Los estudios indican que la caña de azúcar, por ejemplo, puede producir hasta 70 litros de bioetanol por tonelada (López, 2024).

Pero es necesario desarrollar un procedimiento técnico claro y replicable que permita producir bioetanol de estas biomásas y caracterizar sus propiedades, para comparar su perfil como combustible automotor y generar información confiable sobre su desempeño en motores de combustión interna.

Antecedentes

Desde hace varios años, la investigación sobre bioetanol se ha concentrado en aprovechar la biomasa agrícola como materia prima renovable orientada a la reducción de la dependencia de combustibles de origen fósil. En Ecuador, tesis como la de (Larrea Rosero, 2019) han demostrado la viabilidad técnica de producir bioetanol por el proceso de digestión mediante enzimas de almidones de yuca, papa y camote. Por otro lado, estudios previos han aprovechado residuos de yuca y otros vegetales para producir etanol mediante enzimas celulolíticas y fermentación (Cojitambo Gaona, 2020).

Asimismo, se ha evaluado el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos en Ecuador; por ejemplo, (Alvarado Ludeña, 2021) analizó la producción de bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar como materia prima, utilizando un proceso de hidrólisis enzimática, fermentación y destilación, mostrando que estos residuos agrícolas pueden transformarse eficazmente. Además, (Robles Ortega & Salamea Cárdenas, 2023) desarrollaron un estudio con los residuos de hojas y cogollos de caña de azúcar tratados por explosión de vapor, logrando producir azúcares fermentables y, posteriormente, bioetanol

Sin embargo, a pesar de estos avances, no existe un procedimiento técnico consolidado y comparativo en el contexto ecuatoriano que abarque varias biomásas agrícolas (como yuca, papa y bagazo de caña) bajo un mismo protocolo experimental. Las metodologías empleadas

en las tesis mencionadas difieren en sus pasos clave: pretratamiento, fuente de enzimas, condiciones de fermentación y tipos de análisis. Esta falta de uniformidad impide una comparación objetiva de rendimientos, pureza y viabilidad automotriz.

Por ello, es necesaria una investigación que desarrolle un procedimiento técnico estandarizado, comenzando desde la preparación del sustrato, pasando por la fermentación y la destilación, hasta llegar a la caracterización del bioetanol y su prueba en condiciones similares para todas las biomásas. Esta carencia metodológica en los estudios previos justifica el presente trabajo, pues permitirá generar datos comparables y fiables para evaluar cuál biomasa agrícola es más eficiente y si el bioetanol producido cumple con criterios de calidad para uso automotriz.

Importancia y Alcances

La creación de un procedimiento técnico para producir bioetanol a partir de biomasa agrícola tiene una relevancia estratégica en el panorama energético ecuatoriano. Actualmente, alrededor del 80 % de la matriz energética del país proviene de combustibles fósiles, principalmente gasolina y diésel, lo que evidencia una alta dependencia de fuentes no renovables (IIGE, 2021). Entre 2013 y 2023, la demanda de energía en Ecuador creció un 18,3 %, según el Balance Energético Nacional, lo que refleja un aumento persistente en el consumo de derivados de petróleo. Esto hace urgente la búsqueda de alternativas renovables locales que reduzcan la vulnerabilidad energética del país.

Por otro lado, la agricultura ecuatoriana produce volúmenes significativos de cultivos como la caña de azúcar: solo para 2022 se reportaron más de 7,7 millones de toneladas métricas de caña de azúcar cosechadas. Además, el Panorama Agroestadístico del Ministerio de Agricultura estima que la producción de cultivos como la papa y la yuca tiene una participación importante en la agricultura nacional. Estas biomásas, muchas veces subutilizadas o consideradas residuos, constituyen una fuente accesible para la producción local de bioetanol.

La contribución esperada de este trabajo de grado es múltiple. En el plano ambiental, la producción de bioetanol podría contribuir a reducir las emisiones netas de CO₂, ya que parte de la biomasa utilizada provendría de residuos agrícolas que de otro modo no serían aprovechados. En términos energéticos, este proyecto podría fortalecer una evolución hacia un enfoque de economía circular y más sustentable, disminuyendo la dependencia del petróleo importado. Además, académicamente, la investigación permite alentar capacidades técnicas en estudiantes de ingeniería automotriz mediante la aplicación de procesos reales, como la fermentación, la destilación y la caracterización del bioetanol.

La importancia institucional también es evidente: entidades como el IIGE y el Ministerio de Agricultura podrían beneficiarse con datos empíricos sobre la viabilidad del bioetanol. A su vez, el sector agroproductivo rural podría tener un incentivo adicional para valorizar sus residuos agrícolas, generando valor añadido. Asimismo, el sector automotriz podría explorar el uso de biocombustibles locales con criterios técnicos validados.

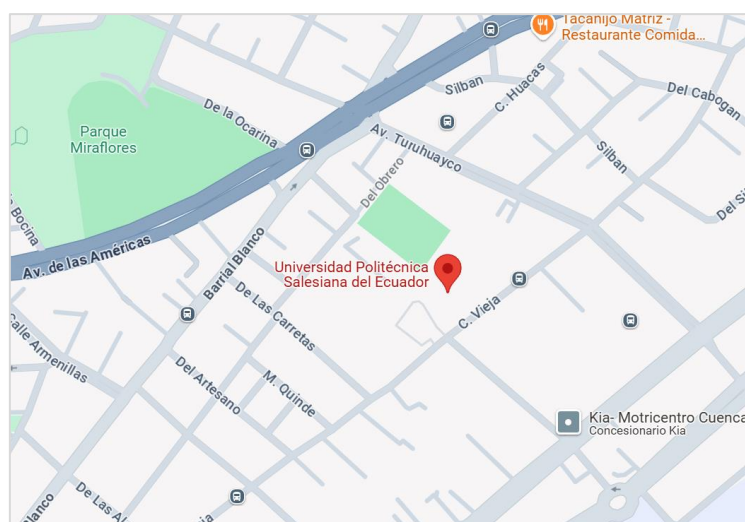
En cuanto a los alcances del proyecto, la investigación se circunscribe a un nivel de laboratorio: se diseñará, implementará y validará un procedimiento técnico para transformar papa, yuca y caña de azúcar en bioetanol. Este proceso abarca todas las etapas desde la preparación de la biomasa, la fermentación y la destilación, hasta la caracterización fisicoquímica del bioetanol (densidad, alcohol, entre otras) y su comparación con estándares para combustibles automotrices.

Delimitación

La presente investigación se delimita geográficamente al contexto ecuatoriano, tomando como referencia principal la disponibilidad de biomasa agrícola en el país y desarrollándose experimentalmente en la ciudad de Cuenca, dentro de los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana. Este enfoque permite trabajar con cultivos representativos de la región andina y litoral, como la papa, la yuca y la caña de azúcar, los cuales son comúnmente utilizados o generadores de residuos en la producción agrícola nacional.

Figura 1

Ubicación del proyecto en Cuenca y zona de intervención.



Nota: Vista del área de intervención del proyecto institucional en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. Tomado de (Google Maps, 2025).

En cuanto al alcance temporal, el proyecto se desarrolla durante el periodo académico 67 , tiempo en el cual se realizará la obtención de información, el diseño metodológico, la ejecución experimental y el análisis de datos. Esta ventana temporal permite obtener resultados coherentes y comparables, considerando los recursos disponibles y las condiciones estables de laboratorio durante la investigación.

Respecto a la delimitación sectorial, el estudio se enmarca en tres áreas principales: el sector agrícola, por ser la fuente de la biomasa utilizada; el sector energético, por su relación directa con la producción de biocombustibles junto con la diversificación de la matriz energética nacional; y el sector automotriz, debido a que el bioetanol obtenido será evaluado en función de parámetros relevantes para su potencial uso en motores de combustión interna. El trabajo no abarca procesos de producción a escala industrial ni análisis económicos de comercialización, enfocándose exclusivamente en nivel laboratorio.

Finalmente, la delimitación institucional establece que el proyecto se desarrolla bajo la supervisión y recursos de la Universidad Politécnica Salesiana, particularmente en el área de Ingeniería Automotriz y sus laboratorios asociados. Aunque se consideran lineamientos y datos de instituciones nacionales como el MAG, IIGE y entidades de normalización, estas no participan directamente en la ejecución del proyecto; su rol es únicamente referencial para contextualizar la relevancia del estudio.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un procedimiento técnico de conversión para la obtención de bioetanol a través de biomasa agrícola para aplicación automotriz.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar información técnica y científica sobre los procesos de obtención de bioetanol a partir de biomasa agrícola, mediante la revisión de artículos, libros y fuentes académicas especializadas.
- Implementar el procedimiento técnico para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola de papa, yuca y caña de azúcar, aplicando métodos de fermentación y destilación validados experimentalmente.
- Analizar comparativamente los resultados obtenidos del bioetanol producido y verificar su desempeño en motores de combustión interna, mediante pruebas experimentales que permitan evaluar la capacidad de ignición y funcionamiento básico del motor con este combustible

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Energías renovables y biocombustibles

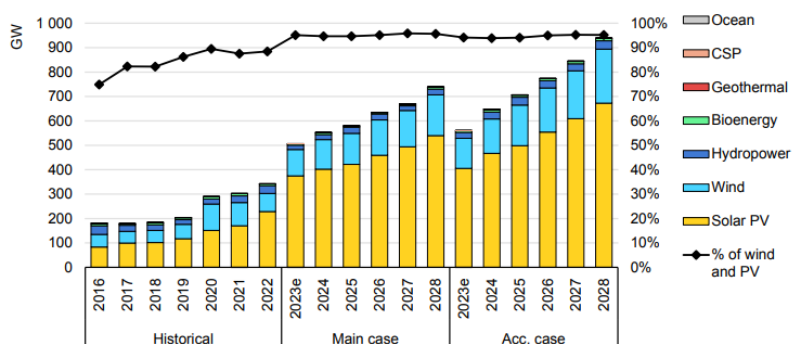
1.1.1 Problemática energética y ambiental

Durante décadas, el desarrollo industrial y del transporte ha dependido casi exclusivamente de los combustibles de origen fósil, tales como el petróleo, el gas natural y el carbón. Esta dependencia ha generado serios problemas ambientales, principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales inciden en el calentamiento global y en el cambio climático. Además, la naturaleza finita de estos recursos ha provocado incertidumbre energética, fluctuaciones económicas y una necesidad cada vez mayor de diversificar las fuentes de energía a nivel mundial.

Diversos estudios internacionales coinciden en que el sector del transporte constituye uno de los principales responsables del consumo de combustibles fósiles, lo que hace indispensable la exploración de alternativas energéticas que contribuyan a la disminución de las emisiones contaminantes sin comprometer el funcionamiento de los sistemas actuales. En este contexto, las energías renovables surgen como una respuesta técnica y ambientalmente viable para enfrentar la problemática energética global. ((IPCC), 2022)

Figura 2

Esquema general de las fuentes de energía renovable.



Nota. Tomado de (International Energy Agency, 2023)

1.1.2 Energías renovables: concepto y clasificación

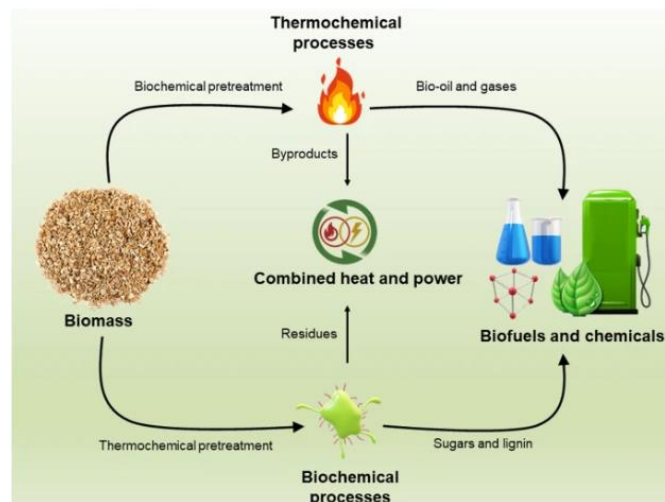
Las energías renovables son aquellas formas de energía que provienen de recursos naturales con capacidad de renovarse de manera constante o en períodos cortos, en contraste con los combustibles fósiles. Dentro de las principales fuentes renovables se

incluyen la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la bioenergía, las cuales presentan distintas propiedades y campos de aplicación.

En particular, la bioenergía ocupa un lugar relevante debido a su versatilidad, ya que puede transformarse en energía térmica, eléctrica o en combustibles líquidos como el bioetanol y el biodiésel. Esta característica permite su aplicación directa en sectores donde la electrificación total aún presenta limitaciones técnicas, como el transporte automotriz. (REN21, 2024)

Figura 3

Integración de rutas hidrotérmicas y bioquímicas para conversión de biomasa en biocombustibles.



Nota. Tomado de (Ahmed Osman, 2021)

1.1.3 Importancia de los biocombustibles en el sector automotriz

Los biocombustibles representan una alternativa estratégica para el sector automotriz, ya que permiten mitigar las emisiones netas de dióxido de carbono al aprovechar el carbono previamente capturado por la biomasa durante su crecimiento. Además, su uso en forma de mezclas con combustibles convencionales posibilita su implementación sin modificaciones significativas en los motores de combustión interna existentes.

El bioetanol, en particular, destaca por su alto número de octano y su capacidad para mejorar la combustión en motores de encendido por chispa. Estas propiedades lo

convierten en un combustible renovable adecuado para contribuir a la transición energética del transporte, especialmente en países con alta disponibilidad de biomasa agrícola. ((IEA), 2023)

1.2 Clasificación de los biocombustibles

Los biocombustibles se clasifican principalmente en función del tipo de materia prima utilizada y del nivel de desarrollo tecnológico del proceso de obtención. Esta clasificación permite comprender las ventajas, limitaciones y aplicaciones energéticas de cada tipo, así como su impacto ambiental y su viabilidad técnica dentro de los sistemas energéticos actuales. A nivel académico e industrial, la división más aceptada corresponde a biocombustibles de primera, segunda y tercera generación, categorización que responde tanto a criterios técnicos como a consideraciones de sostenibilidad y disponibilidad de recursos (Demirbas, 2009).

Esta clasificación resulta especialmente relevante para el presente trabajo de investigación, ya que el bioetanol obtenido a partir de biomasa agrícola como la papa, la yuca y la caña de azúcar se enmarca en los biocombustibles de primera generación, aunque comparte ciertos principios tecnológicos con procesos de generaciones posteriores.

Tabla 1

Comparación general entre etanol y bioetanol

| Característica | Etanol | Bioetanol |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Fórmula química | C ₂ H ₅ OH | C ₂ H ₅ OH |
| Origen | Fósil o biológico | Exclusivamente biológico |
| Materia prima | Petróleo, gas natural o biomasa | Biomasa agrícola |
| Tipo de recurso | No siempre renovable | Renovable |
| Proceso de obtención | Síntesis química o fermentación | Fermentación alcohólica y destilación |
| Uso principal | Industrial, farmacéutico y químico | Combustible alternativo |
| Aplicación energética | Limitada | Alta |

| | | |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Uso automotriz | No destinado directamente | Mezclas con gasolina (E5–E10) |
| Impacto ambiental | Variable | Menor huella de carbono |
| Emisiones de CO ₂ | Dependientes del origen | Reducción neta de emisiones |

A pesar de que el etanol y el bioetanol comparten la misma estructura química, su diferenciación se fundamenta en el origen de la materia prima, el proceso de obtención y su finalidad de uso. El bioetanol, al producirse exclusivamente a partir de biomasa agrícola mediante procesos de fermentación y destilación, presenta ventajas ambientales y energéticas frente al etanol de origen fósil. Estas características justifican su clasificación como biocombustible de primera generación y su aplicación en mezclas con gasolina, aspecto que resulta fundamental en el marco del presente trabajo (Balat & Balat, 2009).

Figura 4

Biomasa como fuente de biocombustibles de primera, segunda y tercera generación.



Fuente: Tomado de: (Segui, 2025)

1.2.1 Biocombustibles de origen primario

Los biocombustibles de origen primario se producen a partir de materias primas agrícolas tradicionales que contienen azúcares, almidones o aceites vegetales fácilmente convertibles en combustibles líquidos. Entre los ejemplos más representativos se encuentran el bioetanol obtenido de caña de azúcar, maíz o yuca, y el biodiésel producido

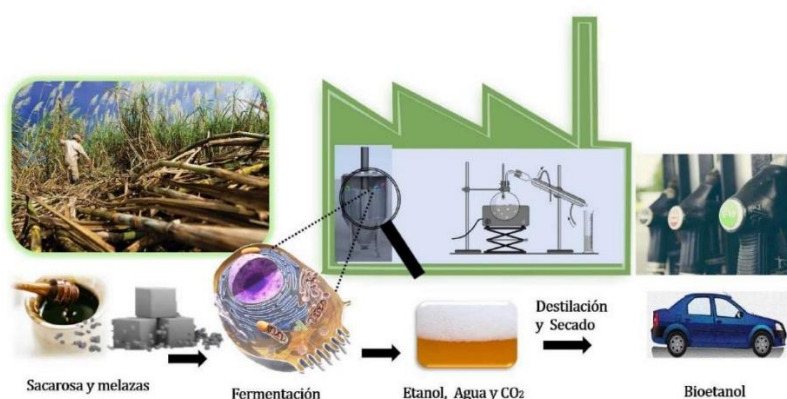
a partir de aceites vegetales como la soya o la palma africana. Estos biocombustibles se caracterizan por el uso de tecnologías relativamente simples y ampliamente estudiadas, como la fermentación alcohólica y la destilación en el caso del bioetanol (Balat M. , 2011)

Una de las principales ventajas de los biocombustibles de origen primario es su viabilidad técnica y económica a corto plazo, debido a la disponibilidad de materia prima y a la madurez de los procesos de producción. Sin embargo, su desarrollo ha generado debate debido a la competencia potencial con la producción de alimentos y al uso intensivo de tierras agrícolas, especialmente en países con alta dependencia del sector agrícola (FAO, 2018).

En el contexto ecuatoriano, cultivos como la caña de azúcar, la papa y la yuca representan una fuente importante de biomasa con alto contenido de carbohidratos fermentables, lo que los convierte en materias primas adecuadas para la producción de bioetanol a pequeña y mediana escala. Por esta razón, el presente estudio se enfoca en este tipo de biocombustible, priorizando un enfoque técnico-experimental que permita evaluar su rendimiento y aplicabilidad energética.

Figura 5

Etapas de transformación de la caña de azúcar en biocombustible.



Fuente: (Jiménez, 2021)

1.2.2 Biocombustibles de segunda etapa

Los biocombustibles de segunda etapa surgen como una alternativa para reducir las limitaciones asociadas a los biocombustibles de origen primario. Estos se producen a partir de biomasa lignocelulósica, como residuos agrícolas, forestales o subproductos

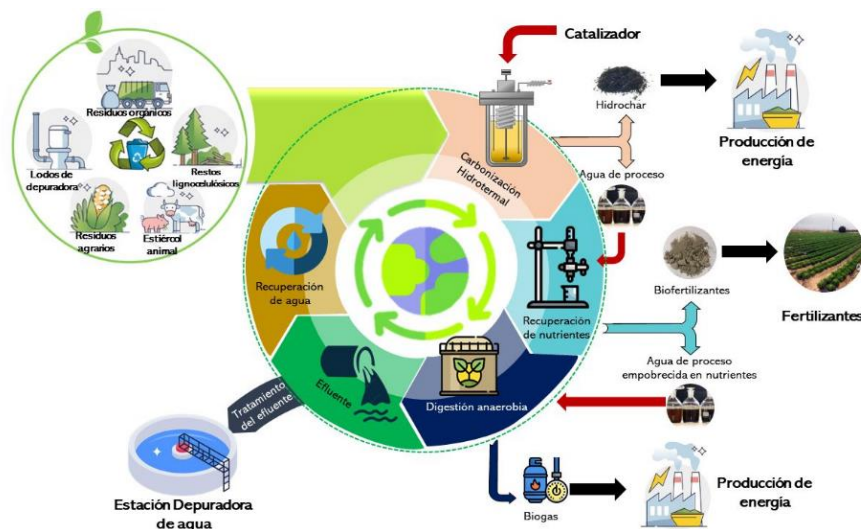
agroindustriales, incluyendo paja, bagazo, cáscaras y residuos de cosecha. A diferencia de las materias primas convencionales, estos materiales no compiten directamente con la producción de alimentos, lo que mejora su perfil de sostenibilidad (Demirbas, 2009).

El principal desafío técnico de los biocombustibles de segunda etapa radica en la complejidad de su estructura química, particularmente en la presencia de lignina, celulosa y hemicelulosa. Esto requiere procesos de pretratamiento más avanzados, como hidrólisis química o enzimática, que incrementan los costos de producción y la complejidad operativa (Balat & Balat, 2009)

A pesar de estas dificultades, los biocombustibles de segunda generación representan una opción prometedora a largo plazo, especialmente en países con alta producción de residuos agrícolas. Su desarrollo continúa siendo objeto de investigación, con el objetivo de optimizar los procesos y reducir los costos asociados.

Figura 6

Diagrama del proceso de gestión de residuos biomásicos a través de carbonización hidrotermal dentro de un enfoque de economía circular.



Fuente: (Universidad Autónoma de Madrid, 2020)

1.2.3 Biocombustibles de generación avanzada

Los biocombustibles de generación avanzada se basan principalmente en el uso de microalgas y otros microorganismos con alta capacidad de producción de lípidos o compuestos energéticos. Este tipo de biocombustible ha despertado un notable interés

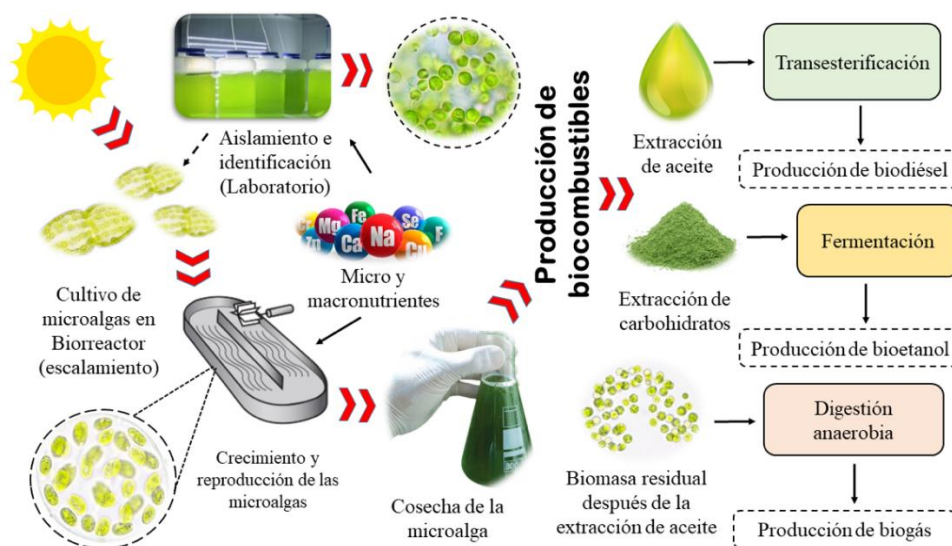
debido a su elevado rendimiento por unidad de área y a su capacidad para crecer en ambientes no agrícolas, como aguas residuales o zonas no aptas para cultivos convencionales (Paredes, 2019)

Entre sus principales ventajas se encuentran la alta eficiencia fotosintética, la captura de dióxido de carbono durante su desarrollo y la posibilidad de producir distintos tipos de biocombustibles, como biodiésel, bioetanol y biogás. No obstante, los costos de producción, cosecha y procesamiento de microalgas siguen siendo elevados, lo que limita su aplicación comercial a gran escala en la actualidad (Demirbas, 2009)

Actualmente, los biocombustibles de tercera generación se encuentran en una fase principalmente experimental y de desarrollo tecnológico. A pesar de ello, representan una línea de investigación estratégica para el futuro energético, especialmente en escenarios de transición hacia fuentes renovables más eficientes y sostenibles.

Figura 7

Diagrama simplificado de la aplicación de las microalgas en la producción de combustibles alternativos.



Fuente: (Academia de Ciencias de Morelos, 2024)

1.3 Bioetanol como combustible renovable

El bioetanol se ha consolidado como uno de los combustibles renovables más utilizados a nivel mundial para el sector transporte, debido a su origen biológico, su

compatibilidad con motores de encendido por chispa y su capacidad para reducir emisiones contaminantes en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Su aplicación en mezclas con gasolina o como combustible puro representa una alternativa viable dentro de las estrategias de transición energética y descarbonización del transporte.

1.3.1 Definición y estructura química del bioetanol

El bioetanol corresponde a un alcohol etílico producido a partir de la fermentación de azúcares contenidos en biomasa de origen agrícola, como caña de azúcar, maíz, yuca o papa, mediante la acción de microorganismos, principalmente levaduras del género *Saccharomyces*. Desde el enfoque químico, el bioetanol es equivalente al etanol de procedencia petroquímica, ya que ambos presentan la misma fórmula molecular y configuración estructural, diferenciándose únicamente en el origen de su materia prima.

La molécula de etanol está compuesta por dos átomos de carbono, seis de hidrógeno y uno de oxígeno (C_2H_6O), presentando un grupo hidroxilo ($-OH$) que le confiere propiedades polares. Esta característica favorece su miscibilidad con el agua y su comportamiento como solvente, aspectos relevantes tanto en su producción como en su uso como combustible. La presencia del oxígeno en su estructura molecular contribuye a una combustión más completa en comparación con la gasolina convencional. (Licht, 2022)

1.3.2 Propiedades físicas y químicas del bioetanol

El bioetanol presenta propiedades físicas y químicas que afectan directamente en su comportamiento como combustible. A temperatura ambiente, es un líquido incoloro, volátil y con un olor característico. Su densidad es menor que la del agua y ligeramente inferior a la de la gasolina, lo que afecta la dosificación volumétrica en sistemas de inyección.

Desde el punto de vista químico, el bioetanol es un compuesto oxigenado, con un contenido de oxígeno aproximado del 35% en peso. Esta propiedad favorece una combustión más adecuada, reduciendo la formación de monóxido de carbono y material particulado. Sin embargo, su carácter higroscópico implica una alta afinidad por la humedad, lo que exige un control adecuado durante el almacenamiento y la distribución para evitar problemas de separación de fases en mezclas con gasolina. (Heywood, 2018)

1.3.3 Poder calorífico y número de octano

El poder calorífico del bioetanol es inferior al de la gasolina, debido a su menor contenido energético por unidad de masa y volumen. Mientras la gasolina representa un poder calorífico inferior aproximado de 42–44 MJ/kg, el bioetanol alcanza valores cercanos a 26–27 MJ/kg. Esta diferencia se convierte en un mayor consumo volumétrico de combustible cuando se emplea bioetanol puro o en altas concentraciones.

No obstante, una de las principales ventajas del bioetanol es su elevado número de octano, que supera valores de 108 RON. Esta característica mejora la resistencia a la detonación, permitiendo mayores relaciones de compresión y un funcionamiento más eficiente del motor, especialmente en motores diseñados o adaptados para combustibles oxigenados. En este sentido, el bioetanol no solo actúa como combustible, sino también como mejorador del octanaje en mezclas con gasolina. (International Energy Agency, 2023)

1.3.4 Bioetanol frente a la gasolina convencional

En comparación con la gasolina convencional, el bioetanol ofrece ventajas ambientales significativas, especialmente en la reducción de emisiones netas de dióxido de carbono, ya que el carbono liberado durante la combustión forma parte del ciclo biogénico. Además, su contenido de oxígeno favorece una combustión más eficiente, lo que contribuye a la disminución de emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos no quemados.

Sin embargo, el bioetanol también presenta limitaciones técnicas frente a la gasolina, como su menor poder calorífico y su mayor afinidad por el agua, lo que puede demostrar desafíos en el almacenamiento y la compatibilidad con materiales del sistema de combustible. A pesar de ello, su uso en mezclas como E10, E20 o E85 ha demostrado ser técnicamente viable, siempre que los motores y sistemas estén adecuadamente calibrados. (Osman, 2021)

1.4 Biomasa agrícola como materia prima para la obtención de bioetanol

La biomasa agrícola constituye una de las principales fuentes renovables para la producción de bioetanol, debido a su disponibilidad, composición química favorable y capacidad de regeneración. Su aprovechamiento energético permite transformar recursos agrícolas en combustibles alternativos, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética y al desarrollo de procesos sostenibles (Balat M. , 2011).

1.4.1 Definición de biomasa agrícola

La biomasa agrícola se define como el conjunto de materiales de origen vegetal generados a partir de actividades agrícolas, incluyendo cultivos, residuos de cosecha y subproductos agroindustriales. Estos materiales se caracterizan por su contenido orgánico, principalmente compuesto por carbohidratos, celulosa, hemicelulosa y, en menor proporción, lignina, lo que los lleva a una fuente potencial de energía renovable (FAO, 2018).

Desde el punto de vista energético, la biomasa agrícola puede ser transformada mediante procesos bioquímicos o termoquímicos en diferentes tipos de biocombustibles. En el caso del bioetanol, la fracción rica en azúcares y almidones resulta especialmente relevante, ya que puede ser convertida en alcohol etílico a través de procesos de fermentación alcohólica relativamente simples y ampliamente estudiados (Demirbas, 2009)

El uso de biomasa agrícola como materia prima presenta ventajas técnicas y ambientales, como la reducción de residuos, la disminución de emisiones netas de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento de recursos locales. No obstante, su adecuada selección y caracterización es fundamental para garantizar un rendimiento energético eficiente y un proceso de producción viable.

Figura 8

Ejemplo de biomasa agrícola, papa superchola utilizada como insumo para la obtención de bioetanol.



Fuente: (Autores)

1.4.2 Biomasa con alto contenido de azúcares y almidón

La biomasa con alto contenido en azúcares y almidones constituye la base principal para la elaboración de bioetanol de origen primario. Este tipo de biomasa incluye cultivos como la caña de azúcar, la yuca, la papa y el maíz, los cuales presentan altas concentraciones de sacarosa, glucosa o polisacáridos fácilmente hidrolizables. Estas características permiten su conversión directa o indirecta en azúcares fermentables, facilitando el proceso de producción de etanol.

En el caso de la caña de azúcar, el contenido de sacarosa permite una fermentación directa del jugo extraído, lo que se traduce en altos rendimientos de bioetanol. Por otro lado, cultivos como la yuca y la papa requieren una etapa previa de hidrólisis del almidón para liberar azúcares simples, proceso que puede realizarse mediante métodos térmicos o enzimáticos (Balat, 2011)

La selección de biomasa con alto contenido en azúcares y almidones resulta estratégica para investigaciones a escala de laboratorio, ya que permite evaluar el rendimiento del bioetanol obtenido bajo condiciones controladas y comparar el comportamiento energético del combustible producido. Por esta razón, estas materias primas son ampliamente utilizadas en estudios experimentales relacionados con combustibles alternativos.

1.4.3 Importancia de la biomasa agrícola en el Ecuador

En el Ecuador, la biomasa agrícola representa un recurso estratégico debido a la diversidad de cultivos y a la relevancia del sector agrícola en la economía nacional. Productos como la caña de azúcar, la papa y la yuca se cultivan ampliamente en distintas regiones del país, generando tanto producción primaria como residuos agrícolas con potencial energético significativo (MAG, 2020)

El aprovechamiento de la biomasa agrícola para la producción de bioetanol permite disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados y promueve el desarrollo de alternativas energéticas basadas en recursos locales. Además, este enfoque contribuye a la valorización de subproductos agrícolas que, en muchos casos, no reciben un tratamiento adecuado y pueden generar impactos ambientales negativos (FAO, 2018).

Desde una perspectiva técnica y académica, el uso de biomasa agrícola en el Ecuador abre oportunidades para el desarrollo de investigaciones aplicadas, proyectos piloto y procesos de innovación en el ámbito de los biocombustibles.

1.5 Materias primas de origen agrícola empleadas en la producción de bioetanol

La selección de la materia prima es un factor determinante en la eficiencia técnica y energética del proceso de obtención de bioetanol. Las materias primas agrícolas ricas en azúcares y almidones permiten alcanzar mayores rendimientos de fermentación y facilitan el control del proceso a escala experimental. En este contexto, la caña de azúcar, la yuca y la papa destacan por su disponibilidad, composición química y relevancia agrícola (Balat, 2011).

1.5.1 Caña de azúcar

La caña de azúcar constituye una de las principales materias primas utilizadas a escala mundial en la obtención de bioetanol, debido a su alto contenido de sacarosa y a la facilidad de conversión de sus azúcares fermentables. El jugo extraído del tallo puede ser sometido directamente al proceso de fermentación alcohólica, lo que reduce la necesidad de etapas previas de tratamiento y mejora el rendimiento global del proceso (Demirbas, 2009).

Desde el punto de vista energético, la caña de azúcar presenta una elevada productividad por hectárea, lo que la convierte en una opción eficiente para la obtención de bioetanol. Además, sus subproductos, como el bagazo, pueden ser aprovechados como fuente de energía térmica o eléctrica, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso productivo (Academia de Ciencias de Morelos, 2021).

Figura 9

Producción agrícola de caña de azúcar.



Fuente: (Cherlinka, 2023)

En el Ecuador, la caña de azúcar tiene una amplia presencia en regiones como la Costa y parte de la Sierra, donde su cultivo está asociado tanto a la producción de azúcar

como de alcohol. Esta disponibilidad la posiciona como una materia prima estratégica para estudios experimentales y aplicaciones futuras en el ámbito de los biocombustibles.

1.5.2 Yuca

La yuca es una materia prima agrícola con alto contenido de almidón, lo que la convierte en una fuente potencialmente eficiente para la producción de bioetanol. A diferencia de la caña de azúcar, la yuca requiere una etapa previa de hidrólisis para transformar el almidón en azúcares simples que puedan ser fermentados por microorganismos (Balat, 2011)

Una de las principales ventajas de la yuca es su capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas y su cultivo en suelos de baja fertilidad, lo que permite su producción en zonas donde otros cultivos presentan limitaciones. Esto amplía su potencial como recurso energético, especialmente en países con economías agrícolas diversificadas (FAO, 2018)

Figura 10

Biomasa agrícola - yuca



Fuente: (Autores)

En el contexto ecuatoriano, la yuca es un cultivo ampliamente distribuido, principalmente en la región Costa y la Amazonía. Su uso como materia prima para bioetanol representa una alternativa para agregar valor a la producción agrícola y diversificar el destino de este recurso más allá del consumo alimentario tradicional.

1.5.3 Papa

La papa es un tubérculo con un elevado contenido de almidón, lo que la convierte en una materia prima viable para la obtención de bioetanol mediante procesos de hidrólisis y fermentación. Su composición permite liberar azúcares fermentables cuando se somete a tratamientos térmicos o enzimáticos adecuados, facilitando su conversión en alcohol etílico (Demirbas, 2009).

Una característica relevante de la papa es la posibilidad de utilizar tubérculos que no cumplen estándares comerciales para el consumo humano, reduciendo así el impacto sobre la seguridad alimentaria. Este enfoque favorece el aprovechamiento de excedentes agrícolas y residuos, alineándose con principios de sostenibilidad y economía circular (Balat & Balat, 2009).

Figura 11

Cultivo de papa



Fuente: (Vasyl Cherlinka, 2024)

En el Ecuador, la papa es un cultivo emblemático de la región Sierra, con una producción significativa destinada tanto al mercado interno como a la agroindustria. Su disponibilidad y bajo costo relativo la convierten en una materia prima adecuada para estudios experimentales a escala de laboratorio orientados a evaluar el rendimiento del bioetanol y su comportamiento energético en motores de combustión interna.

1.6 Etapas generales para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola

1.6.1 Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso de naturaleza biotecnológica mediante el cual los azúcares fermentables presentes en la biomasa agrícola son transformados en etanol y dióxido de carbono, a través de la acción de microorganismos, principalmente levaduras del género *Saccharomyces*, siendo *Saccharomyces cerevisiae* la más utilizada a nivel industrial. Este proceso constituye la etapa central en la producción de bioetanol, ya que determina en gran medida el rendimiento y la concentración alcohólica del producto final. La fermentación se desarrolla en condiciones anaeróbicas y requiere un control preciso de parámetros operativos como la temperatura, el pH, la concentración de azúcares y el tiempo de proceso. Generalmente, temperaturas entre 30 y 35 °C y valores de pH cercanos a 4,5–5,5 favorecen la actividad metabólica de las levaduras y permiten una conversión eficiente de los azúcares en etanol. Desviaciones significativas de estas condiciones pueden provocar inhibición microbiana, reducción del rendimiento o formación de subproductos no deseados.

En el caso de biomásas ricas en almidón, como la papa y la yuca, la fermentación solo es viable una vez que los polisacáridos han sido previamente hidrolizados a azúcares simples. Para biomasa rica en azúcares, como la caña de azúcar, el proceso puede realizarse de forma más directa, lo que representa una ventaja en términos de simplicidad y eficiencia operativa. (Walker & Stewart, 2016)

1.6.2 Destilación del bioetanol

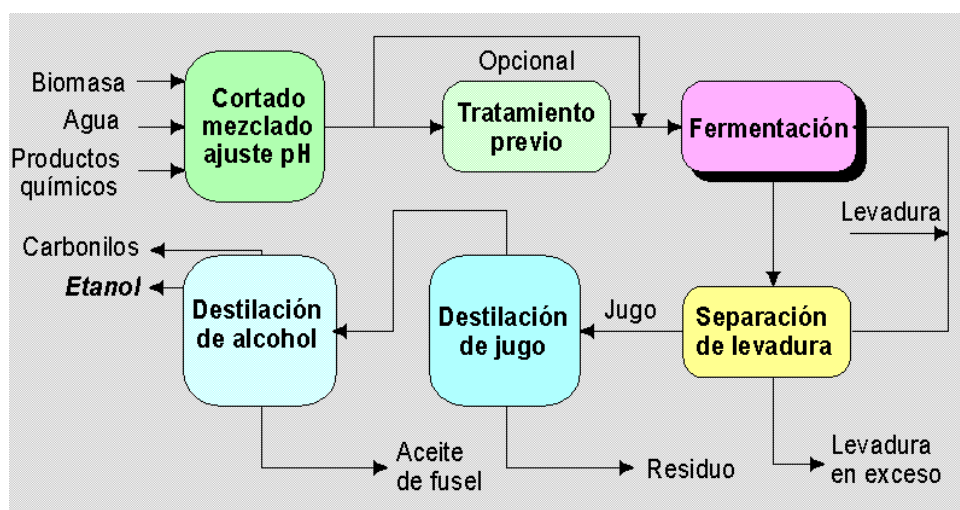
La destilación del bioetanol es el proceso físico mediante el cual se separa y concentra el etanol presente en el mosto fermentado, aprovechando la diferencia en los puntos de ebullición entre el etanol y el agua. Dado que el etanol hierve aproximadamente a 78,4 °C y el agua a 100 °C, es posible obtener una corriente rica en etanol mediante vaporización selectiva y posterior condensación.

En sistemas convencionales, la destilación permite alcanzar concentraciones alcohólicas del orden del 90 al 96 % en volumen. Sin embargo, para aplicaciones automotrices, el bioetanol debe cumplir con altos estándares de pureza, lo que puede requerir etapas adicionales de destilación fraccionada o procesos complementarios de

deshidratación. La eficiencia del proceso depende del diseño del equipo, del número de etapas de separación y del control térmico durante la operación.

Figura 12

Esquema general del proceso de fermentación alcohólica aplicado a la producción de bioetanol.



Fuente: (Jarabo, 2025)

La destilación representa una de las etapas más intensivas en consumo energético dentro del proceso de producción de bioetanol, por lo que su optimización es fundamental para mejorar la viabilidad técnica y económica del biocombustible. El producto final debe cumplir con especificaciones internacionales que garanticen su calidad y compatibilidad con motores de encendido por chispa. (Balat, 2008)

1.6.3 Limitaciones del proceso de destilación

El proceso de destilación, aunque ampliamente utilizado en la producción de bioetanol, presenta limitaciones técnicas que afectan la pureza y eficiencia del producto final. Una de las principales restricciones es la formación del azeótropo etanol-agua, que se produce alrededor del 95,6 % de etanol en volumen, lo que impide alcanzar mayores concentraciones mediante destilación simple.

Adicionalmente, la destilación requiere un elevado consumo energético debido a las etapas de calentamiento y condensación, lo que incrementa los costos operativos, especialmente en sistemas de pequeña y mediana escala. Asimismo, este proceso no elimina completamente ciertos compuestos secundarios, como alcoholes superiores y

otros volátiles, por lo que el bioetanol destinado a uso automotriz debe cumplir normas técnicas específicas, como la ASTM D4806, que regulan su calidad fisicoquímica (Zabed, H. et al., 2017).

Tabla 2

Principales limitaciones del proceso de destilación aplicado a la producción de bioetanol

| Limitación | Descripción | Impacto en el proceso |
|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Formación de azeótropo | Mezcla etanol-agua al 95,6 % | Limita la pureza alcanzable |
| Alto consumo energético | Requiere calentamiento y condensación | Incremento de costos |
| Eliminación incompleta de impurezas | Presencia de alcoholes superiores | Afecta la calidad del combustible |
| Restricciones normativas | Exigencias de normas técnicas | Necesidad de control de calidad |

1.7 Normativa técnica aplicada al bioetanol combustible

1.7.1 Norma ASTM D4806

La norma ASTM D4806 es una especificación técnica internacional desarrollada por ASTM International que establece los requisitos que debe cumplir el etanol desnaturalizado destinado a ser utilizado como combustible o como componente en mezclas con gasolina para motores de encendido por chispa. Esta norma define límites específicos para diversas propiedades fisicoquímicas del etanol, tales como el contenido mínimo de etanol, el porcentaje máximo permitido de agua y metanol, etc.

La norma ASTM D4806 establece métodos de ensayo estandarizados para comprobar que el etanol cumple con los parámetros de calidad requeridos, asegurando su seguridad y compatibilidad con aplicaciones automotrices. Debido a su reconocimiento internacional y a su actualización continua, esta norma se utiliza como referencia técnica en la producción y control del bioetanol combustible. A continuación, se presenta una tabla resumen con sus principales propiedades (ASTM International, 2025).

Tabla 3*Principales propiedades fisicoquímicas del etanol combustible según ASTM D4806*

| Propiedad | Requisito típico | Unidad | Finalidad técnica |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|
| Contenido de etanol | $\geq 92,1$ | % v/v | Asegura poder energético |
| Contenido de agua | $\leq 1,0$ | % v/v | Evita corrosión |
| Contenido de metanol | $\leq 0,5$ | % v/v | Reduce riesgos toxicológicos |
| Densidad a 20 °C | 0,79 – 0,81 | g/cm ³ | Control de dosificación |
| Punto de ebullición | ~78 | °C | Caracteriza volatilidad |
| Acidez total | $\leq 0,007$ | g ácido acético/100 ml | Minimiza corrosión |
| Residuos no volátiles | ≤ 5 | mg/100 ml | Control de impurezas |
| Apariencia | Clara y libre de partículas | — | Garantiza limpieza |
| Contenido de azufre | ≤ 30 | mg/kg | Protege sistemas de escape |

Nota: Tomado de (ASTM International, 2025)

1.7.2 Norma NTE INEN 2478

La NTE INEN 2478:2009 es la norma técnica ecuatoriana que establece los requisitos que debe cumplir el etanol anhidro grado carburante y desnaturalizado para su uso en mezclas con combustibles líquidos dentro del territorio nacional. Es una norma voluntaria desarrollada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) que define propiedades físicas y químicas como el contenido mínimo de etanol (por ejemplo, $\geq 99,6$ % para etanol anhidro grado carburante), límites máximos de acidez, contenidos máximos de agua, densidad a 20 °C y otros parámetros que aseguran la calidad del producto.

Además de los requisitos de composición, la NTE INEN 2478 especifica que el etanol debe ser incoloro, transparente y libre de impurezas, y detalla métodos de ensayo asociados. También define las condiciones de transporte, almacenamiento y la obligación de que las sustancias desnaturalizantes sean gasolinas que cumplan con la norma ecuatoriana correspondiente. Este marco normativo es fundamental para que el bioetanol

producido en Ecuador pueda integrarse de forma segura en combustibles comerciales sin comprometer los equipos automotrices. ((INEN), 2009)

1.7.3 Importancia de la normalización del bioetanol para uso automotriz

La norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2478:2009 establece los requisitos que debe cumplir el etanol anhidro grado carburante y desnaturalizado destinado a su uso en mezclas con combustibles líquidos dentro del territorio nacional. Esta norma, desarrollada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), define parámetros fisicoquímicos fundamentales relacionados con la pureza del etanol, tales como el contenido mínimo de alcohol, los límites máximos de agua, acidez y otras impurezas, así como requisitos de apariencia y densidad. Asimismo, la norma especifica métodos de ensayo para la verificación de estas propiedades y establece condiciones para el transporte, almacenamiento y desnaturalización del producto, garantizando su compatibilidad con los sistemas automotrices y su uso seguro como combustible. En este contexto, a continuación, se presenta una tabla resumen con los principales requisitos fisicoquímicos exigidos por la norma NTE INEN 2478 para el etanol combustible en el Ecuador.

Tabla 4

Principales requisitos fisicoquímicos del etanol combustible según la norma NTE INEN 2478

| Propiedad | Requisito establecido | Unidad | Importancia técnica |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Contenido de etanol | $\geq 99,6$ | % v/v | Garantiza alta pureza |
| Contenido de agua | $\leq 0,4$ | % v/v | Evita corrosión y fallas |
| Densidad a 20 °C | 0,789 – 0,791 | g/cm ³ | Control de calidad |
| Acidez total | $\leq 0,007$ | g ácido acético/100 ml | Minimiza corrosión |
| Apariencia | Incoloro y transparente | — | Asegura ausencia de impurezas |
| Residuos no volátiles | ≤ 5 | mg/100 ml | Control de contaminantes |
| Sustancia desnaturalizante | Gasolina conforme a norma | — | Seguridad y control |
| Compatibilidad | Apta para mezcla con gasolina | — | Uso automotriz seguro |

1.8 Antecedentes y estudios previos

El estudio del bioetanol como combustible renovable ha sido abordado ampliamente en investigaciones internacionales y nacionales, especialmente en el contexto de la transición energética y la reducción de emisiones contaminantes. Estos antecedentes permiten comprender el estado actual del conocimiento, los avances tecnológicos logrados y las limitaciones aún existentes en los procesos de producción y aplicación automotriz del bioetanol a partir de biomasa agrícola.

1.8.1 Investigaciones internacionales

A nivel internacional, múltiples investigaciones han analizado la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola como alternativa sostenible a los combustibles fósiles. (Balat M. &, 2009) realizaron un estudio integral sobre la producción de bioetanol a partir de materias primas agrícolas, destacando que cultivos con alto contenido en azúcares y almidones, como la caña de azúcar y la yuca, presentan altos rendimientos energéticos y balances positivos de emisiones de carbono. Los autores concluyen que el bioetanol puede disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero cuando se produce bajo condiciones controladas y con tecnologías adecuadas.

De manera similar, (Cardona, 2007) evaluaron las tecnologías de fermentación y destilación utilizadas en la elaboración de bioetanol a nivel industrial, señalando que el control de variables como temperatura, pH y tiempo de fermentación es determinante para maximizar la conversión de azúcares en etanol. Su estudio resalta que los avances en procesos biotecnológicos han permitido mejorar la eficiencia global del bioetanol, haciéndolo competitivo frente a la gasolina convencional en ciertos contextos.

Asimismo, estudios realizados por la (IEA, International Energy Agency, 2023) indican que el bioetanol es uno de los biocombustibles líquidos más utilizados a nivel mundial, principalmente en mezclas con gasolina, y que su adopción ha contribuido a diversificar la matriz energética del sector transporte en países como Brasil y Estados Unidos.

1.8.2 Investigaciones nacionales

En el contexto ecuatoriano, las investigaciones sobre bioetanol se han centrado principalmente en la evaluación del potencial de la biomasa agrícola local y su posible aplicación en el sector energético. Estudios desarrollados por la Universidad Central del

Ecuador (Morales, 2020) han analizado la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, evidenciando que este cultivo presenta condiciones favorables debido a su alto contenido de sacarosa y disponibilidad en el país. Los resultados muestran que es posible obtener bioetanol con niveles de pureza adecuados para su uso como combustible, siempre que se apliquen procesos adecuados de fermentación y destilación.

Por otro lado, investigaciones realizadas en la Escuela Politécnica Nacional (Paredes, 2019) han evaluado el uso de materias primas alternativas como la yuca y la papa, concluyendo que, aunque presentan rendimientos menores en comparación con la caña de azúcar, representan una opción viable en regiones donde estos cultivos son abundantes. Estos estudios resaltan la importancia de adaptar los parámetros del proceso a las características específicas de cada biomasa.

Además, trabajos nacionales coinciden en que la implementación del bioetanol en Ecuador debe alinearse con la normativa técnica vigente, como la NTE INEN 2478, para asegurar su compatibilidad con motores de combustión interna y su integración segura en mezclas con gasolina.

1.8.3 Análisis crítico de investigaciones previas

El análisis de los estudios internacionales y nacionales permite identificar avances significativos en los procesos de producción de bioetanol, especialmente en el control de la fermentación y la optimización de la destilación. Sin embargo, gran parte de las investigaciones se centran en una sola materia prima o en condiciones de laboratorio, lo que limita la extrapolación directa de los resultados a contextos reales de producción a pequeña o mediana escala.

Asimismo, se observa que muchos estudios evalúan el bioetanol desde el punto de vista químico y energético, pero pocos analizan de manera experimental su desempeño en motores de combustión interna, particularmente en condiciones reales de operación. Esta brecha evidencia la necesidad de investigaciones que integren la producción de bioetanol con pruebas prácticas en motores, evaluando aspectos como la capacidad de ignición y el funcionamiento básico del motor.

2. DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO TÉCNICO DE CONVERSIÓN DE BIOMASA AGRÍCOLA A BIOETANOL

2.1 Introducción al procedimiento técnico de conversión de biomasa agrícola

En este capítulo se desarrolla el procedimiento técnico de conversión de biomasa agrícola a bioetanol, empleando papa, yuca y caña de azúcar como materias primas. El procedimiento se ejecuta con un enfoque experimental y secuencial, aplicando procesos de fermentación alcohólica y destilación, con el objetivo de transformar los carbohidratos presentes en cada biomasa en alcohol etílico susceptible de evaluación para su aplicación automotriz.

La papa y la yuca se consideran biomásas ricas en almidón, por lo que requieren una etapa previa de acondicionamiento y macerado enzimático para la obtención de azúcares fermentables, mientras que la caña de azúcar, al presentar azúcares simples, se incorpora directamente al proceso de fermentación. Cada biomasa se procesa de forma independiente, manteniendo criterios de control y repetibilidad experimental, lo que permite analizar su comportamiento dentro del procedimiento técnico desarrollado.

2.2 Selección y caracterización de las biomásas agrícolas

La selección de las biomásas agrícolas se realizó considerando parámetros técnicos como el contenido de carbohidratos, la facilidad de procesamiento, la estabilidad durante el manejo y su compatibilidad con procesos de fermentación alcohólica. Bajo estos criterios se trabajó con papa, yuca y caña de azúcar, las cuales permiten evaluar el comportamiento del proceso bajo diferentes tipos de sustrato.

La caracterización preliminar de las biomásas se centró en la identificación del tipo de carbohidrato predominante y su influencia directa en las operaciones unitarias posteriores. En el caso de la papa y la yuca, el almidón constituye el principal componente estructural, lo que condiciona la necesidad de un pretratamiento térmico para su aprovechamiento. En contraste, la caña de azúcar presenta azúcares directamente fermentables, lo que simplifica su incorporación al proceso y permite establecer comparaciones técnicas entre materias primas con distinta complejidad de conversión.

2.2.1 Criterios de selección de biomasas

La selección de las biomasas agrícolas se fundamenta en criterios técnicos que permiten garantizar la viabilidad del procedimiento de conversión a bioetanol dentro del contexto experimental de la investigación. Uno de los criterios considerados es la disponibilidad local, ya que la papa, la yuca y la caña de azúcar son materias primas accesibles en el entorno, lo que facilita su obtención, manejo y repetibilidad del proceso.

Otro criterio relevante es el contenido de carbohidratos fermentables, debido a su influencia directa en el rendimiento del proceso de producción de bioetanol. La presencia de almidón en la papa y la yuca, así como de azúcares simples en la caña de azúcar, permite evaluar diferentes rutas de conversión dentro de un mismo procedimiento técnico, manteniendo condiciones de fermentación comparables.

Finalmente, se considera la relevancia de estas biomasas en estudios de bioetanol, ya que su uso es frecuente en investigaciones similares, lo que posibilita contrastar el comportamiento del proceso.

2.2.2 Criterios de selección de biomasas

En el procedimiento técnico se emplean tres tipos de biomasa agrícola: papa, yuca y caña de azúcar, seleccionadas en función de su contenido de carbohidratos y su comportamiento durante las etapas de preparación, fermentación y destilación. Estas biomasas presentan características distintas que influyen directamente en el provecho del proceso de obtención de bioetanol.

La papa se utiliza como biomasa rica en almidón, por lo que necesita un tratamiento previo para la conversión de este polisacárido en azúcares fermentables. Para ello, la biomasa es sometida a procesos de lavado, cocción y trituración, obteniéndose un puré homogéneo que facilita la gelatinización del almidón y su posterior aprovechamiento durante el macerado.

De manera similar, la yuca presenta un alto contenido de almidón, mientras que la caña de azúcar se caracteriza por su elevada concentración de azúcares simples, lo que permite una fermentación más directa. El uso de estas biomasas permite comparar su desempeño y eficiencia en la producción de bioetanol.

Figura 13

Papa superchola usada como biomasa agrícola



Fuente: (Autores)

La yuca se integra al procedimiento bajo un tratamiento similar al de la papa, debido a su alto contenido de almidón. Tras su acondicionamiento y cocción, se obtiene un puré que permite evaluar su comportamiento fermentativo bajo las mismas condiciones experimentales.

Figura 14

Preparación de la yuca como insumo para la producción de bioetanol



Fuente: (Autores)

La caña de azúcar se emplea como biomasa rica en azúcares simples, lo que permite su incorporación directa a la etapa de fermentación, una vez obtenida la pulpa o el jugo.

Figura 15

Acondicionamiento de la caña de azúcar para su uso como biomasa agrícola



Fuente: (Autores)

2.2.3 Clasificación de las biomásas según su composición

Las biomásas agrícolas empleadas en el procedimiento se clasifican según el tipo de carbohidrato predominante, debido a que este factor determina el tratamiento previo requerido antes de la fermentación alcohólica. La papa y la yuca presentan un alto contenido de almidón, por lo que se consideran biomásas ricas en almidón y requieren procesos de cocción y macerado enzimático para su conversión en azúcares fermentables.

En cambio, la caña de azúcar contiene principalmente azúcares simples, como sacarosa, glucosa y fructosa, lo que permite su fermentación directa sin necesidad de una etapa de maceración previa. Esta característica simplifica el proceso de preparación del sustrato, ya que los azúcares se encuentran disponibles para la acción de la levadura desde el inicio de la fermentación. Además, la ausencia de un proceso de conversión de almidón reduce el tiempo total del procedimiento y minimiza posibles pérdidas de eficiencia asociadas a etapas adicionales de tratamiento térmico o enzimático.

A continuación, se muestra una tabla en la que se detalla la clasificación de las biomásas agrícolas utilizadas, el tipo de carbohidrato predominante y el tratamiento previo requerido dentro del procedimiento.

Tabla 5*Clasificación de las biomásas agrícolas según su composición y tratamiento previo*

| Biomasa | Tipo de carbohidrato predominante | Clasificación de la biomasa | Tratamiento previo requerido | Etapa clave del procedimiento |
|----------------|--|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Papa | Almidón | Biomasa rica en almidón | Cocción y macerado enzimático | Conversión de almidón a azúcares |
| Yuca | Almidón | Biomasa rica en almidón | Cocción y macerado enzimático | Conversión de almidón a azúcares |
| Caña de azúcar | Azúcares simples (sacarosa) | Biomasa rica en azúcares | Fermentación directa | Fermentación alcohólica |

2.3 Esquema general del procedimiento de conversión

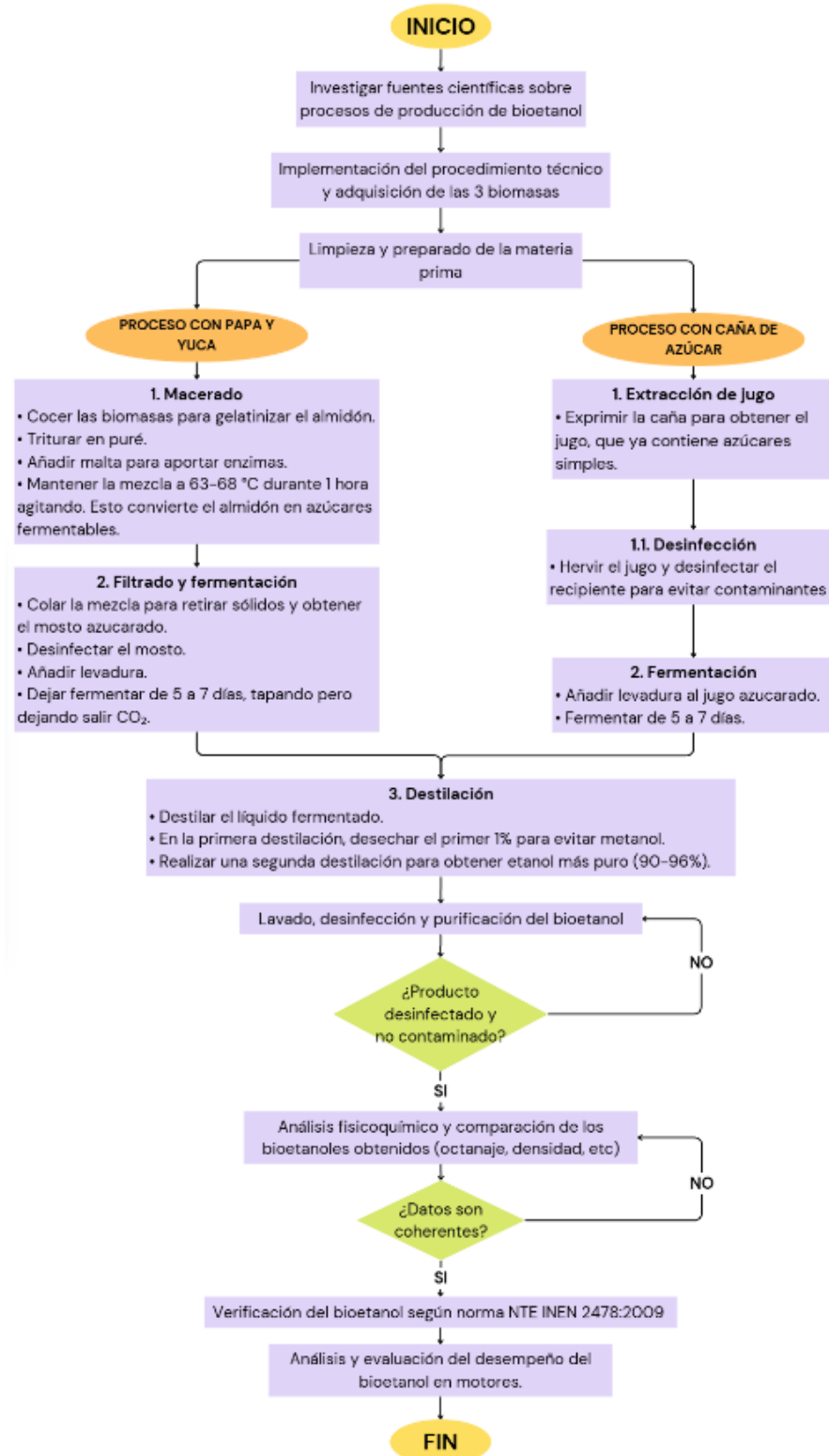
El procedimiento técnico de conversión para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola se desarrolla de manera secuencial, iniciando con la preparación de la biomasa y culminando con la obtención del producto fermentado listo para la etapa de destilación. El proceso se estructura considerando las diferencias en la composición de cada biomasa, lo que permite separar las etapas iniciales según se trate de biomásas ricas en almidón o ricas en azúcares simples, manteniendo etapas comunes en la fermentación alcohólica.

Para la papa y la yuca, el procedimiento incluye etapas de cocción, trituración, macerado enzimático, filtrado y obtención del mosto fermentable. En el caso de la caña de azúcar, el proceso se simplifica al eliminar la etapa de macerado, ya que los azúcares se encuentran disponibles para la fermentación. A partir de la obtención del mosto, el procedimiento converge en etapas comunes de desinfección, fermentación alcohólica y acondicionamiento del fermentado.

A continuación, se presenta el esquema general del procedimiento de conversión, donde se resume el flujo del proceso desde la biomasa agrícola hasta la obtención del mosto fermentable.

Figura 16

Diagrama de flujo del procedimiento técnico para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola.



Fuente: (Autores)

2.4 Preparación de la biomasa agrícola

La preparación de la biomasa agrícola constituye la primera etapa operativa del procedimiento técnico de conversión, cuyo objetivo es acondicionar la materia prima para las etapas posteriores de transformación en bioetanol. Esta etapa se desarrolla considerando las características físicas y composicionales de cada biomasa, asegurando condiciones adecuadas para la obtención del sustrato fermentable.

La preparación incluye la obtención de la biomasa, la eliminación de impurezas y la aplicación de tratamientos previos específicos según el tipo de carbohidrato predominante. En el caso de las biomásas de alto contenido en almidón, como la papa y la yuca, se requiere un tratamiento térmico previo, mientras que la caña de azúcar presenta un acondicionamiento distinto debido a su contenido de azúcares simples. A continuación, se detallan las etapas de preparación aplicadas a cada tipo de biomasa dentro del procedimiento experimental.

2.4.1 Obtención y acondicionamiento de la biomasa

La biomasa agrícola utilizada en el procedimiento se obtiene en estado fresco y se acondiciona previamente con el fin de eliminar impurezas que puedan interferir en el desarrollo del proceso. La papa, la yuca y la caña de azúcar se someten inicialmente a una etapa de limpieza mediante lavado con agua, retirando tierra, residuos sólidos y material extraño presente en la superficie.

Posteriormente, cada biomasa se acondiciona de acuerdo con sus características físicas. La papa y la yuca se preparan para su procesamiento térmico, mientras que la caña de azúcar se acondiciona para la obtención de la pulpa. Este acondicionamiento permite trabajar con materia prima homogénea y controlada, facilitando la correcta ejecución del procedimiento experimental.

En la Figura 17 se muestra el proceso de limpieza y acondicionamiento de la papa.

Figura 17

Lavado y limpieza inicial de la papa como biomasa agrícola



Fuente: (Autores)

En la Figura 18 se muestra el proceso de limpieza y acondicionamiento de la yuca.

Figura 18

Lavado y limpieza inicial de la yuca como biomasa agrícola



Fuente: (Autores)

En la Figura 19 se presenta el acondicionamiento de la caña de azúcar previo a la obtención de la pulpa.

Figura 19

Biomasa de caña de azúcar previamente lavada para su proceso de extracción de pulpa



Fuente: (Autores)

Adicionalmente, en la Tabla 6 se detallan las cantidades iniciales de biomasa empleadas en cada ensayo experimental.

Tabla 6

Cantidades iniciales de biomasa agrícola empleadas en el procedimiento

| Biomasa | Estado de la biomasa | Cantidad empleada | Observaciones |
|----------------|-----------------------------|--------------------------|---|
| Papa | Fresca | 9kg | Biomasa seleccionada sin daños visibles |
| Yuca | Fresca | 8kg | |
| Caña de azúcar | Pulpa / Jugo | 20L | Pulpa obtenida de caña fresca |

2.4.2 Preparación de biomosas ricas en almidón (papa y yuca)

La preparación de las biomosas ricas en almidón, correspondientes a la papa y la yuca, se realiza mediante un tratamiento térmico previo cuyo objetivo es acondicionar la materia prima para las etapas posteriores del procedimiento técnico. Este tratamiento permite ablandar la estructura del material vegetal y favorecer la gelatinización del almidón, condición necesaria para su posterior conversión en azúcares fermentables.

Las biomasas previamente acondicionadas se someten a un proceso de cocción en agua hasta alcanzar una textura blanda y uniforme. Durante esta etapa se controlan las condiciones de cocción, asegurando que tanto la papa como la yuca presenten un comportamiento similar dentro del procedimiento.

➤ **Papa**

Figura 20

Etapa de cocción de la papa.



Fuente: (Autores)

➤ **Yuca**

Figura 21

Etapa de cocción de la yuca.



Fuente: (Autores)

Una vez finalizada la cocción, se observa que la biomasa presenta una consistencia más blanda y homogénea, lo que evidencia la gelatinización del almidón y facilita su procesamiento mecánico posterior. Esta condición es fundamental para garantizar una adecuada trituración y una mayor eficiencia en la etapa de macerado enzimático.

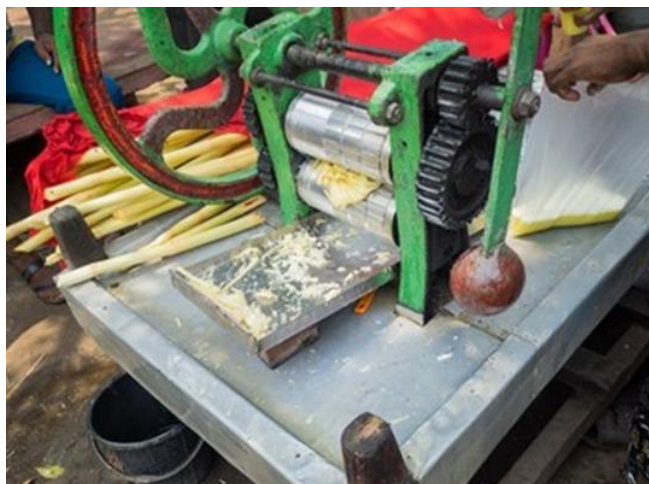
2.4.3 Preparación de biomasa de alto contenido en azúcares simples (caña de azúcar)

La caña de azúcar, al presentar un alto contenido de azúcares simples, no requiere un proceso de macerado enzimático previo. Su preparación se orienta principalmente a la obtención de la pulpa o jugo azucarado que será utilizado como sustrato fermentable en el proceso.

La biomasa previamente acondicionada se procesa para la obtención de la pulpa de caña de azúcar, obteniéndose un sustrato líquido rico en azúcares fermentables. Durante esta etapa se controla la manipulación del material con el fin de evitar la incorporación de impurezas sólidas que puedan afectar las etapas posteriores.

Figura 22

Extracción de jugo de caña de azúcar



Fuente: (Autores)

Una vez obtenida la pulpa, se requiere a un proceso de ebullición con el fin de realizar la desinfección del sustrato previo a la fermentación alcohólica. Este tratamiento térmico permite reducir la presencia de microorganismos no deseados que puedan

interferir en el desarrollo del proceso fermentativo. El detalle del proceso de desinfección se describe en el apartado correspondiente.

Figura 23

Proceso de hervido de la pulpa de la caña de azúcar



Fuente: (Autores)

Posteriormente, la pulpa desinfectada se deja enfriar hasta alcanzar condiciones adecuadas para su utilización en la etapa de fermentación alcohólica.

2.5 Trituración, obtención y pesaje del sustrato

La trituración de la biomasa cocida permite obtener un sustrato homogéneo y adecuado para las etapas posteriores del procedimiento técnico de conversión. Esta etapa se aplica a las biomásas ricas en almidón, correspondientes a la papa y la yuca, y se desarrolla de manera similar para ambas, manteniendo un tratamiento individual de cada sustrato. El pesaje del material obtenido permite controlar la cantidad de sustrato empleada y establecer proporciones adecuadas para el macerado enzimático.

2.5.1 Obtención y pesaje de “puré” de papa

La papa cocida se somete a un proceso de trituración mecánica con el objetivo de obtener un puré homogéneo. Para esta operación se utiliza un taladro eléctrico acoplado

a una broca mezcladora, el cual permite una adecuada desintegración del material y una agitación uniforme del sustrato. La trituración se realiza empleando el mismo medio acuoso de cocción, facilitando la formación del puré y evitando pérdidas de material.

Figura 24

Trituración de la papa cocida mediante broca mezcladora acoplada a taladro eléctrico



Fuente: (Autores)

Después de batir bien, una vez obtenido un buen puré, este se transfiere a un recipiente adecuado y se procede a su pesaje utilizando una balanza, con el fin de determinar la cantidad total de sustrato disponible para la etapa de macerado enzimático. El control de masa en esta etapa es fundamental para establecer la proporción de malta a emplear en el proceso.

Figura 25

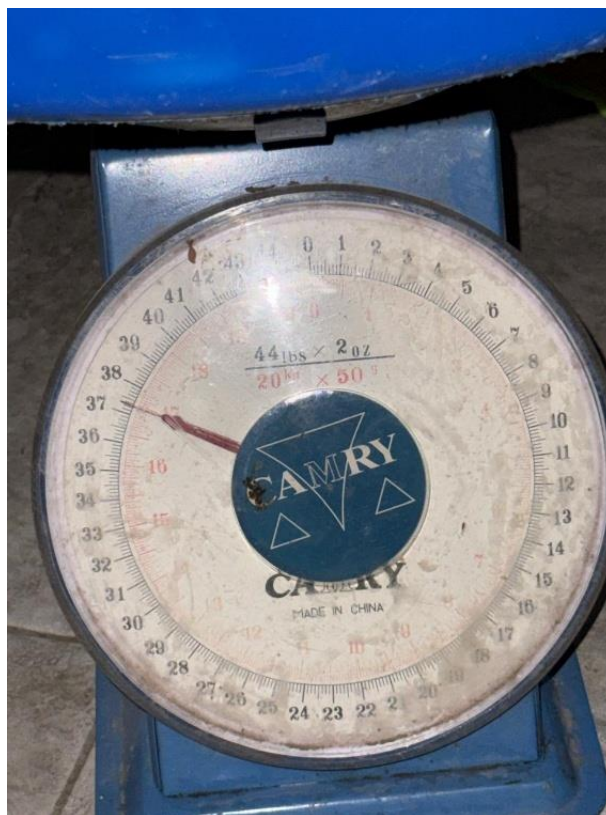
Pesaje del pure de papa obtenido



Fuente: (Autores)

Figura 26

Visualización de peso en balanza del pure obtenido de la papa previo a la maceración



Fuente: (Autores)

Como se puede observar en la Figura 26, el pesaje obtenido del puré de papa es de 17 kg, valor que corresponde a la cantidad de materia prima procesada previo a la etapa de maceración.

2.5.2 Obtención y pesaje de “puré” de yuca

La yuca cocida se procesa de manera independiente siguiendo un procedimiento similar al aplicado para la papa. La biomasa se somete a trituración mecánica utilizando un taladro eléctrico con broca mezcladora, logrando la homogeneización del sustrato y la reducción granulométrica. Durante la trituración se utiliza el medio acuoso de cocción para facilitar la obtención del puré.

Figura 27

Trituración de la yuca cocida mediante broca mezcladora acoplada a taladro eléctrico



Fuente: (Autores)

El puré de yuca obtenido se transfiere a un recipiente independiente y se procede a su pesaje mediante una balanza. Este pesaje permite conocer la cantidad de sustrato disponible y establecer las proporciones necesarias para el macerado enzimático posterior.

Figura 28

Pesaje del pure obtenido de la yuca previo a la maceración



Como se puede observar en la Figura 27, el pesaje obtenido del puré de yuca es de 14 kg, correspondiente a la masa final obtenida tras el proceso de trituración y acondicionamiento del mosto.

2.6 Proceso de macerado enzimático (papa y yuca)

El proceso de macerado enzimático se aplicó a los purés de papa y yuca con el fin de convertir el almidón presente en estos sustratos en azúcares fermentables. Esta etapa es fundamental dentro del proceso de obtención de alcohol, considerando que la levadura no metaboliza el almidón de manera directa.

El macerado se realizó bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y agitación, empleando malta de cebada como fuente de enzimas amilolíticas, garantizando una adecuada hidrólisis del almidón previo a la etapa de fermentación.

Figura 29

Malta de cebada usada para el proceso de macerado



Fuente: (Autores)

2.6.1 Principio del macerado enzimático (papa y yuca)

La malta de cebada se encuentra en estado seco previo a su incorporación al proceso de macerado. Con el objetivo de facilitar la liberación y acción de las enzimas presentes en la malta, se realiza un proceso de trituración mecánica, el cual permite aumentar el área superficial del grano y mejorar su interacción con el sustrato rico en almidón.

El triturado de la malta se efectúa en seco mediante el uso de una licuadora convencional, sin adición de agua. El resultado de la trituración corresponde a una mezcla de granulometría intermedia, evitando una pulverización excesiva que pueda dificultar etapas posteriores del proceso.

Figura 30

Proceso de triturado de malta de cebada para proceso de macerado



Fuente: (Autores)

Este procedimiento se aplica de manera análoga tanto para el proceso asociado al puré de papa como para el puré de yuca, manteniendo las mismas condiciones de trituración y preparación de la malta.

2.6.2 Cálculo de la cantidad de malta de cebada a adicionar

2.6.2.1 Cálculo de la malta para el puré de papa

Una vez obtenido el puré final de papa y determinado su peso total, se procede al cálculo de la cantidad de malta de cebada necesaria para el proceso de macerado. El criterio de cálculo se establece en función de una proporción del 15 % de malta respecto al peso total del puré (HRom, 2025), con el fin de garantizar una adecuada concentración de enzimas capaces de transformar el almidón en azúcares fermentables.

El peso total del puré de papa obtenido es:

$$m_{\text{puré papa}} = 17\text{kg}$$

La masa de malta requerida se determina mediante la siguiente expresión:

$$m_{\text{malta papa}} = 0.15 * m_{\text{puré papa}}$$

Sustituyendo valores:

$$m_{\text{malta papa}} = 0.15 * 17 \text{ kg}$$

$$m_{\text{malta papa}} = 2.55 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la cantidad de malta de cebada adicionada al puré de papa para el proceso de macerado corresponde a 2,55 kg.

Figura 31

Pesaje de 2,55 kg de malta de cebada calculados como el 15 % del puré de papa.



Fuente: (Autores)

Previamente a la incorporación de la malta de cebada, el puré de papa es sometido a un proceso de calentamiento progresivo hasta aproximarse a condiciones de ebullición. Este calentamiento inicial permite preparar el sistema para la etapa de macerado y favorecer la interacción posterior entre las enzimas y el almidón.

Una vez determinada la masa de malta correspondiente al 15 % del peso total del puré, esta es añadida de manera gradual al sustrato caliente. Durante la adición, la mezcla es removida constantemente mediante un cucharón, con el objetivo de lograr una

distribución homogénea de la malta triturada en todo el volumen del puré y evitar la formación de aglomeraciones.

Figura 32

Adición gradual de la malta de cebada al puré de papa con agitación manual



Fuente: (Autores)

2.6.2.2 Cálculo de la malta para el puré de yuca

De manera análoga al procedimiento aplicado para la papa, una vez obtenido el puré final de yuca se realiza su pesaje total para determinar la cantidad de malta de cebada a adicionar. Se mantiene la misma proporción del 15 % de malta respecto al peso del puré (HRom, 2025), considerando la similitud en la composición rica en almidón de ambas biomásas.

El peso del puré de yuca obtenido se expresa como:

$$m_{\text{puré yuca}} = 14 \text{ kg}$$

La masa de malta correspondiente se calcula mediante la fórmula:

$$m_{\text{malta yuca}} = 0.15 * 14$$

Sustituyendo valores:

$$m_{\text{malta yuca}} = 0.15 * 14 \text{ kg}$$

$$m_{\text{malta yuca}} = 2.1 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la cantidad de malta de cebada a adicionar al puré de yuca para el proceso de macerado corresponde a 2.1 kg, valor que representa el 15 % del peso total del puré obtenido.

Figura 33

Pesaje de 2.1 kg de malta de cebada calculados como el 15 % del puré de yuca.



Fuente: (Autores)

De manera análoga, el puré de yuca es sometido inicialmente a un calentamiento progresivo hasta aproximarse a condiciones de ebullición, con el propósito de acondicionar el sistema para el proceso de macerado. Este calentamiento previo permite mejorar la interacción entre el sustrato y las enzimas presentes en la malta.

Una vez calculada la masa de malta correspondiente al 15 % del peso total del puré de yuca, esta es incorporada de forma gradual al sistema. Durante este proceso, la mezcla es removida continuamente con un cucharón, garantizando una adecuada homogeneización del conjunto y una distribución uniforme de la malta en el medio.

Figura 34

Adición progresiva de la malta de cebada al puré de yuca con agitación manual.



Fuente: (Autores)

2.6.3 Control de variables del macerado

El proceso de macerado requiere el control de determinadas variables operativas que influyen en la eficiencia de la conversión del almidón presente en la biomasa en azúcares fermentables. En este procedimiento, las variables principales consideradas son la temperatura, el tiempo de maceración y la agitación del sistema.

Estas condiciones se controlan de manera similar tanto para el puré de papa como para el puré de yuca, debido a la similitud en su composición rica en almidón y su comportamiento durante el calentamiento.

2.6.3.1 Control de la temperatura de maceración

A lo largo del proceso de macerado, la temperatura del sistema se mantiene dentro de un rango aproximado de 63 a 68 °C, el cual es adecuado para favorecer la actividad de las enzimas presentes en la malta de cebada. Este rango térmico permite la conversión progresiva del almidón en azúcares fermentables sin desnaturalizar las enzimas.

El control de la temperatura se realiza en base al calentamiento directo del recipiente de maceración, monitoreando continuamente el valor térmico con instrumentos

de medición adecuados. Se evita que la mezcla alcance condiciones de ebullición durante esta etapa, ya que temperaturas excesivas pueden afectar negativamente la actividad enzimática.

Figura 35

Control térmico del puré de papa durante el proceso de maceración.



Fuente: (Autores)

Figura 36

Control térmico del puré de yuca durante el proceso de maceración.



Fuente: (Autores)

2.6.3.2 Control del tiempo de maceración

El tiempo de maceración corresponde al intervalo durante el cual el sistema permanece dentro del rango de temperatura establecido para permitir la acción de las enzimas sobre el almidón. En este procedimiento, el tiempo de maceración se fija en 1 hora, contada a partir del tiempo en que el sistema llega la temperatura adecuada.

Este intervalo permite que la reacción enzimática ocurra de manera progresiva, favoreciendo la ruptura de las cadenas de almidón y la formación de azúcares fermentables. Durante todo este periodo, se mantiene un seguimiento visual del sistema y se verifica que las condiciones térmicas se mantengan dentro del rango establecido.

2.6.4.3 Agitación y homogeneización del sistema

La agitación del sistema se realiza de forma manual mediante el uso de un cucharón, con el fin de garantizar una mezcla homogénea entre el puré de biomasa y la malta de cebada triturada. Esta agitación evita la sedimentación de sólidos y permite una distribución igual de las enzimas en todo el volumen del sistema.

Durante todo el proceso de maceración, la mezcla se remueve de manera periódica, lo que favorece el contacto entre el sustrato y las enzimas, mejorando la eficiencia del proceso de conversión.

2.6.4.4 Cierre del proceso de macerado

Una vez transcurrido el tiempo de maceración establecido y mantenidas de forma controlada las condiciones de temperatura y agitación, el sistema se considera apto para continuar con la siguiente etapa del procedimiento. En esta fase, se procede a la separación de los sólidos remanentes, con el fin de evitar interferencias durante la fermentación, y a la obtención del mosto fermentable, el cual contiene los azúcares requeridos para el respectivo desarrollo de la actividad microbiana en las etapas posteriores del proceso.

Figura 37

Estado final del sistema al término del macerado de la papa.



Fuente: (Autores)

Figura 38

Estado final del sistema al término del macerado de la yuca.



Fuente: (Autores)

2.7 Filtrado y obtención del mosto

Una vez finalizada la etapa de macerado, el sistema presenta una mezcla heterogénea compuesta por una fase líquida con alto contenido en azúcares fermentables

y una fase sólida conformada por residuos de biomasa y restos insolubles de malta. Para continuar con el proceso de obtención de bioetanol, es necesario separar ambas fases, obteniendo únicamente el líquido fermentable, denominado mosto.

Este procedimiento se aplica de manera similar para los sistemas de papa y yuca, manteniendo las mismas condiciones de operación.

2.7.1 Separación sólido-líquido

La separación de la fase líquida se realiza mediante un proceso de filtrado mecánico utilizando un colador como medio de retención de los sólidos. La mezcla caliente obtenida tras el macerado se vierte progresivamente sobre el sistema de filtrado, permitiendo que el líquido atraviese el medio mientras los residuos sólidos quedan retenidos.

Durante esta etapa, se ejerce una presión manual moderada sobre los sólidos retenidos con el objetivo de extraer la mayor cantidad posible de líquido remanente, maximizando así el rendimiento del proceso. Como resultado, se obtiene un líquido relativamente claro, libre de partículas gruesas, apto para ser sometido a la etapa de fermentación.

Figura 39

Proceso de filtrado del mosto de papa del sistema mediante colador.



Fuente: (Autores)

Figura 40

Proceso de filtrado del mosto de yuca del sistema mediante colador.



Fuente: (Autores)

2.7.2 Características del mosto obtenido

El líquido recuperado tras el proceso de filtrado corresponde al mosto fermentable, el cual presenta una apariencia turbia, coloración característica según la biomasa empleada y una consistencia homogénea. Este mosto constituye el sustrato base para la etapa de fermentación alcohólica. Previo a su transferencia al fermentador, se registra el volumen total obtenido para cada biomasa, con el fin de llevar un control experimental del proceso y facilitar comparaciones posteriores.

A continuación, se presenta una tabla de registro de los volúmenes de mosto obtenidos tras el filtrado.

Tabla 7

Registro de volumen de mosto obtenido tras el filtrado

| Biomasa | Volumen obtenido (L) | Coloración | Observaciones |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Papa | 19 | Amarillenta | Sin observaciones relevantes |
| Yuca | 16 | Blanca - transparente | Sin observaciones relevantes |
| Caña* | 20 | Ligeramente amarillento | Sin observaciones relevantes |

Nota: La caña de azúcar no requiere etapa de macerado, pero se incluye en la tabla para efectos comparativos.

Figura 41

Muestra de mosto de papa obtenido tras el proceso de filtrado.



Fuente: (Autores)

Figura 42

Muestra de mosto de yuca obtenido tras el proceso de filtrado.



Fuente: (Autores)

Una vez obtenido el mosto fermentable y registrados sus parámetros principales, este se encuentra en condiciones adecuadas para ser sometido al proceso de desinfección y posterior fermentación alcohólica.

2.8 Desinfección del mosto y de la instrumentación

La desinfección del mosto y de la instrumentación constituye una etapa fundamental dentro del procedimiento técnico de conversión de biomasa agrícola a

bioetanol, ya que garantiza condiciones ideales para el desarrollo controlado del proceso de fermentación alcohólica. La presencia de microorganismos no deseados puede alterar significativamente la composición del mosto, generar subproductos indeseables y reducir el rendimiento en etanol, por lo que resulta indispensable aplicar medidas de control microbiológico antes de la inoculación de la levadura.

2.8.1 Importancia del control microbiológico

El control microbiológico tiene como objetivo prevenir la contaminación del mosto por bacterias, hongos o levaduras silvestres que compiten con la levadura seleccionada por los azúcares fermentables. Estas contaminaciones pueden provocar fermentaciones incompletas, producción de ácidos orgánicos, generación de olores indeseables y disminución de la eficiencia del proceso.

En la obtención de bioetanol, especialmente a partir de biomasa agrícola, el mosto representa un medio con alto contenido en nutrientes, lo que lo convierte en un entorno propicio para el crecimiento microbiano. Por esta razón, el control microbiológico previo a la fermentación es esencial para asegurar la reproducibilidad del procedimiento, la estabilidad del proceso y la obtención de resultados confiables para su posterior aplicación en el ámbito automotriz.

2.8.2 Desinfección del mosto mediante ebullición

La desinfección del mosto se realizó mediante el proceso de ebullición, método ampliamente utilizado debido a su eficacia, simplicidad y bajo costo. El mosto obtenido tras el filtrado fue sometido a calentamiento hasta alcanzar el punto de ebullición, manteniéndose en estas condiciones durante un tiempo determinado con el fin de eliminar microorganismos presentes y desactivar posibles enzimas indeseables.

La ebullición permite reducir significativamente la carga microbiana sin alterar de forma sustancial la concentración de azúcares fermentables, asegurando que el sustrato se encuentre en condiciones ideales para la fermentación alcohólica. Posteriormente, el mosto fue enfriado de manera controlada hasta llegar la temperatura ideal para la inoculación de la levadura, evitando así una posible contaminación.

2.8.3 Desinfección de equipos y recipiente

De manera complementaria, todos los equipos, utensilios y recipientes utilizados en las etapas posteriores al filtrado del mosto fueron previamente desinfectados. Entre estos se incluyen ollas, recipientes de almacenamiento, agitadores, embudos y fermentadores. La desinfección se realizó mediante un ácido especial propio para fermentadores, asegurando la eliminación de residuos orgánicos y microorganismos adheridos a las superficies.

La correcta desinfección de la instrumentación es indispensable para evitar contaminaciones cruzadas durante la manipulación del mosto y durante el proceso de fermentación. Esta práctica contribuye a mantener condiciones controladas, mejorar la eficiencia del proceso y garantizar la calidad del bioetanol obtenido al final del procedimiento.

Figura 43

Agitación del fermentador con ácido desinfectante dentro.



Fuente: (Autores)

2.9 Preparación del proceso de fermentación

La preparación del proceso de fermentación constituye una etapa clave dentro del procedimiento de conversión de biomasa agrícola a bioetanol, ya que de ella depende en gran medida la eficiencia del proceso fermentativo y el grado alcohólico alcanzado. En esta fase se definen aspectos fundamentales como la selección de la levadura y la correcta preparación del inóculo, los cuales permiten garantizar un inicio eficaz de la fermentación y un aprovechamiento adecuado de los azúcares fermentables presentes en el mosto

2.9.1 Selección de la levadura

Para el progreso de la presente investigación se seleccionó una levadura con alta capacidad fermentativa y elevada tolerancia alcohólica, capaz de soportar concentraciones de alcohol de hasta aproximadamente 14°. Esta característica permite que el proceso de fermentación se prolongue sin una inhibición prematura de la actividad celular, favoreciendo una mayor transformación de los azúcares fermentables presentes en el mosto.

La elección de este tipo de levadura responde directamente a los objetivos de la investigación, orientados a la obtención de un bioetanol con el mayor grado alcohólico posible, priorizando la eficiencia del proceso sobre las características sensoriales del producto final. Dado que el bioetanol obtenido está destinado a una aplicación energética y automotriz, y no al consumo humano, se considera técnicamente apropiado el uso de levaduras resistentes a altos niveles de alcohol, ya que estas permiten maximizar el rendimiento fermentativo y contribuir a la obtención de un alcohol de mayor pureza tras la etapa de destilación.

➤ Papa

Figura 44

Pesaje de la levadura empleada para la fermentación del mosto de papa, correspondiente a una masa de 20 g.



Fuente: (Autores)

➤ **Caña de azúcar**

Figura 45

Pesaje de la levadura empleada para la fermentación del mosto de caña de azúcar, correspondiente a una masa de 30 g.



Fuente: (Autores)

➤ **Yuca**

Figura 46

Pesaje de la levadura empleada para la fermentación del mosto de yuca, correspondiente a una masa de 20 g.



Fuente: (Autores)

2.9.2 Preparación del starter

Previo a la inoculación del mosto, la levadura fue llevada a un proceso de activación mediante la preparación de un starter, con el objetivo de garantizar un inicio rápido y eficiente de la fermentación. Este procedimiento consistió en mezclar la levadura con una pequeña muestra del mosto en un recipiente limpio, permitiendo que las células se hidrataran y reactivaran su metabolismo antes de ser incorporadas al mosto.

La hidratación se realizó en condiciones controladas, utilizando la muestra a temperatura ambiente, lo que permitió evitar choques térmicos u osmóticos que pudieran afectar la viabilidad de la levadura. La preparación del starter resulta fundamental para reducir el tiempo de latencia del proceso fermentativo, minimizar posibles contratiempos durante el inicio de la fermentación y asegurar una actividad metabólica más rápida y uniforme, contribuyendo así a una conversión más eficiente de los azúcares en alcohol.

Figura 47

Preparación del starter de levadura previo a la etapa de fermentación.



Fuente: (Autores)

2.10 Fermentación alcohólica del mosto

La fermentación alcohólica del mosto constituye la etapa central del procedimiento de conversión de biomasa agrícola a bioetanol, ya que en ella los azúcares fermentables son transformados en etanol y dióxido de carbono por la acción de la levadura. El correcto control de esta etapa permite asegurar un proceso estable, reproducible y con un adecuado rendimiento alcohólico, independientemente del tipo de biomasa empleada.

2.10.1 Inoculación del mosto

La inoculación del mosto se realizó una vez que este alcanzó condiciones adecuadas de temperatura tras el proceso de desinfección. El starter previamente preparado fue incorporado directamente al mosto, asegurando una distribución homogénea de la levadura en todo el volumen del sustrato fermentable. Esta incorporación permitió introducir células activas, reduciendo el tiempo de adaptación de la levadura al nuevo medio.

Previo al cierre del fermentador, se llevó a cabo una oxigenación inicial del mosto mediante agitación manual. Esta oxigenación resulta necesaria durante las primeras etapas del proceso, ya que favorece la multiplicación celular de la levadura y la formación de membranas celulares resistentes, contribuyendo a un mejor desempeño durante la fermentación alcohólica posterior, que se desarrolla en condiciones anaerobias.

Figura 48

Introducción del starter de levadura al mosto como inicio del proceso de fermentación alcohólica.



Fuente: (Autores)

2.10.2 Condiciones de fermentación

La fermentación del mosto se llevó a cabo a temperatura ambiente aproximada de 22 °C, correspondiente a las condiciones climáticas de la ciudad de Cuenca, Ecuador. Esta condición permitió evaluar el comportamiento fermentativo del mosto en un entorno realista y de fácil replicación para aplicaciones prácticas.

El tiempo de fermentación establecido fue de cinco días para los mostos logrados a partir de papa, yuca y caña de azúcar. Este periodo se consideró suficiente para permitir la conversión de la mayor parte de los azúcares fermentables en alcohol, de acuerdo con el comportamiento observado durante el proceso.

El proceso se desarrolló en un fermentador cerrado, equipado con un sistema airlock, el cual permitió la liberación controlada del dióxido de carbono generado durante la fermentación, evitando al mismo tiempo el ingreso de aire y microorganismos externos. El uso de este dispositivo contribuyó a mantener condiciones anaerobias adecuadas y a reducir el riesgo de contaminación del mosto.

➤ **Papa**

Figura 49

Fermentador equipado con airlock utilizado durante la fermentación del mosto de papa



Fuente: (Autores)

➤ **Caña de azúcar**

Figura 50

Fermentador equipado con airlock utilizado durante la fermentación del mosto de caña de azúcar



Fuente: (Autores)

➤ **Yuca**

Figura 51

Fermentador equipado con airlock utilizado durante la fermentación del mosto de yuca



Fuente: (Autores)

2.10.3 Seguimiento del proceso de fermentación

El seguimiento del proceso de fermentación se realizó de manera observacional, considerando como principal indicador la liberación de dióxido de carbono (CO₂) a través del *airlock*. La presencia continua de burbujeo fue interpretada como evidencia de la acción metabólica de la levadura y de la conversión activa de azúcares en alcohol.

Asimismo, el inicio de la fermentación fue identificado por la presencia de espuma en la superficie del mosto y por el aumento progresivo de la actividad gaseosa durante las primeras horas posteriores a la inoculación. Estos indicadores permitieron confirmar el correcto desarrollo del proceso fermentativo y verificar que las condiciones establecidas fueron adecuadas para la producción de etanol.

2.11 Consideraciones del proceso de fermentación según biomasa

El proceso de fermentación alcohólica presentó variaciones en función del tipo de biomasa agrícola utilizada, principalmente debido a las diferencias en su composición química y en la disponibilidad de azúcares fermentables en cada mosto. Aunque las condiciones generales de fermentación fueron similares, se observaron diferencias en el comportamiento fermentativo a lo largo del proceso.

En los mostos de papa y yuca, la fermentación se desarrolló de manera progresiva y estable, condicionada por los procesos previos de macerado y conversión enzimática del almidón en azúcares fermentables. En ambos casos, la actividad fermentativa fue constante, evidenciada por la liberación de dióxido de carbono y la formación de espuma, con una duración aproximada de cinco días y sin presentarse anomalías relevantes.

Por otro lado, el mosto de caña de azúcar mostró una fermentación más intensa debido a la presencia de azúcares simples directamente fermentables, lo que permitió una acción más inmediata de la levadura. Aunque el tiempo de fermentación fue similar al de las otras biomásas, específicamente de 7 días, se evidenció una mayor intensidad del proceso, reflejada en una actividad alcohólica más marcada en comparación con los mostos ricos en almidón.

2.12 Cierre de la etapa de fermentación

Al finalizar el tiempo establecido de fermentación alcohólica, los mostos presentaron condiciones adecuadas para su procesamiento posterior, evidenciando una conversión satisfactoria de los azúcares fermentables en alcohol. La disminución de la liberación de dióxido de carbono y la disminución de la actividad observable en el airlock fueron consideradas indicadores del cierre de la etapa fermentativa.

El fermentado final se caracterizó por la presencia de alcohol, la sedimentación parcial de la levadura y la ausencia de signos de contaminación, confirmando un proceso estable y controlado en los mostos de papa, yuca y caña de azúcar. Posteriormente, el líquido fermentado fue trasvasado a recipientes limpios y desinfectados, evitando la remoción de sedimentos, con el fin de obtener un producto más claro y apto para la etapa de destilación.

2.13 Proceso de destilación del fermentado

La destilación constituye la etapa posterior a la fermentación dentro del procedimiento técnico de conversión de biomasa agrícola en bioetanol. En esta fase, el objetivo principal es separar el alcohol etílico presente en el fermentado del resto de componentes, principalmente agua y residuos solubles, aprovechando la diferencia en los puntos de ebullición de dichas sustancias.

Este proceso se aplicó de manera común a los fermentados obtenidos a partir de las tres biomásas estudiadas (papa, yuca y caña de azúcar), utilizando el mismo equipo y bajo condiciones de operación similares. De esta manera, se garantiza que las diferencias observadas posteriormente en el producto final estén asociadas a la naturaleza de cada biomasa y no a variaciones en el método de destilación.

En el contexto de esta investigación, la destilación no tiene fines alimenticios ni de consumo humano, sino exclusivamente técnicos, ya que el producto obtenido está destinado a ser evaluado como combustible para aplicación automotriz. Por esta razón, el proceso se orienta a maximizar la recuperación del bioetanol sin realizar separación de fracciones por criterios organolépticos.

Figura 52

Ejemplo instrumentación de destilación industrial



Fuente: (VEVOR, 2020)

2.14 Principio de la destilación alcohólica

La destilación alcohólica es un proceso físico de separación que permite aislar el etanol presente en el fermentado mediante la aplicación de calor. Este método se basa en la diferencia de volatilidad entre el alcohol y el agua, lo que permite que el alcohol se evapore primero al alcanzar una determinada temperatura, mientras que el resto de los componentes permanece mayormente en estado líquido.

En este trabajo, el fermentado ingresó al destilador directamente, sin filtrado previo y a temperatura ambiente. Una vez cargado el sistema, este fue cerrado herméticamente y sometido a calentamiento progresivo. El vapor generado se condujo a través del sistema hacia el condensador, donde se enfrió y retornó a fase líquida, permitiendo su recolección como destilado.

2.15 Tipo de destilación empleada

En el presente estudio se empleó un proceso de destilación por tandas (discontinua), en el cual el destilador fue cargado con una cantidad determinada de fermentado, sometido a calentamiento para la separación del alcohol y posteriormente vaciado para iniciar un nuevo ciclo. Este procedimiento se aplicó de manera independiente a los fermentados obtenidos a partir de papa, yuca y caña de azúcar.

El sistema utilizado correspondió a un equipo de destilación simple de tipo artesanal, compuesto por un recipiente de ebullición, un conducto de salida de vapor, un sistema de condensación y un recipiente de recolección. La destilación se realizó en etapas sucesivas con el fin de incrementar progresivamente la concentración de alcohol, evaluándose el porcentaje alcohólico después de cada ciclo para determinar la necesidad de nuevas destilaciones.

Figura 53

Proceso de destilación por tandas.



Fuente: (Autores)

2.16 Destilación del fermentado por tipo de biomasa

En este apartado se refiere al proceso práctico de destilación aplicado a cada uno de los fermentados obtenidos a partir de distintas biomásas. El procedimiento general de destilación fue el mismo en todos los casos; sin embargo, se detallan de manera independiente debido a las diferencias en volumen inicial y concentración alcohólica de cada fermentado, lo cual permitirá una posterior comparación de resultados.

2.16.1 Destilación del fermentado de biomasa 1: [Papa]

El fermentado correspondiente a esta biomasa fue introducido directamente en el destilador artesanal sin ningún tipo de filtrado previo. El equipo se cerró herméticamente y se inició el calentamiento mediante una cocina a gas.

A lo largo de todo el proceso se controló la temperatura interna del destilador mediante el termómetro incorporado. El vapor generado fue conducido a través de una tubería de cobre de 3/8" de diámetro dispuesta en forma de serpentín, sumergida en agua para facilitar la condensación. El destilado obtenido fue recolectado en un solo recipiente. Al finalizar la destilación, se determinó el grado alcohólico del destilado con el fin de evaluar el incremento de la pureza del bioetanol

2.16.2 Destilación del fermentado de biomasa 2: [Caña de azúcar]

El proceso de destilación de esta biomasa se realizó utilizando el mismo equipo y bajo las mismas condiciones operativas descritas anteriormente. El fermentado fue introducido en frío y calentado progresivamente hasta iniciar la destilación.

Se realizó el control continuo de la temperatura interna para identificar el comportamiento del proceso y determinar el final de la destilación. El destilado se recolectó en un solo recipiente y, una vez acabado el proceso, se procedió a la medición de la concentración alcohólica.

2.16.3 Destilación del fermentado de biomasa 3: [Yuca]

Para la tercera biomasa se aplicó el mismo procedimiento de destilación, garantizando la uniformidad del método experimental. El control de la temperatura permitió identificar el momento en el que la destilación dejó de ser eficiente, lo cual indicó el fin del proceso.

El bioetanol obtenido fue recolectado completamente y analizado para determinar su grado alcohólico, con el fin de compararlo posteriormente con los resultados de las otras biomásas.

2.17 Equipo de destilación empleado

Para el proceso de destilación de los fermentados obtenidos a partir de las distintas biomásas, se empleó un destilador de acero inoxidable, construido específicamente para este proyecto, el cual permitió llevar a cabo la separación del alcohol etílico mediante el principio de evaporación y posterior condensación.

El equipo está conformado por una olla metálica de acero inoxidable cerrada herméticamente, en la cual se introduce el fermentado tal como sale del proceso de fermentación. Esta caldera, cuya capacidad es de 22 litros, cuenta con una tapa superior asegurada mediante cierres mecánicos, lo que evita fugas de vapor durante el calentamiento. En la parte superior se encuentra instalada una salida de vapor conectada a una tubería metálica flexible, la cual conduce los vapores generados hacia el sistema de condensación.

El sistema de condensación está elaborado por un serpentín de cobre, el cual se encuentra sumergido en un recipiente con agua a temperatura ambiente. Este serpentín permite que los vapores calientes se enfríen progresivamente, promoviendo su cambio de estado de vapor a líquido, facilitando así la recolección del destilado por gravedad.

Adicionalmente, el equipo cuenta con un termómetro instalado en la parte superior de la caldera, el cual permite monitorear en todo momento la temperatura interna del sistema durante la destilación. Este control es fundamental, ya que el aumento descomunal de la temperatura indica la disminución del contenido de alcohol en el fermentado.

Como fuente de calor se utilizó una cocina a gas, la cual permitió un calentamiento directo y continuo de la olla hasta alcanzar las temperaturas necesarias para la evaporación del alcohol.

Figura 54

Destilador artesanal utilizado en el proceso de destilación



Fuente: (Autores)

2.17.1 Sistema de condensación

El sistema de condensación es una etapa clave del proceso de destilación, ya que permite la conversión de los vapores alcohólicos generados durante la ebullición en un destilado líquido recuperable. Una condensación eficiente resulta esencial para minimizar pérdidas de etanol, asegurar la continuidad del proceso y garantizar una operación controlada y segura.

En el presente procedimiento, el sistema de condensación está conformado por un serpentín de cobre de 3/8 de pulgada de diámetro, seleccionado por su alta conductividad térmica y eficiencia en la transferencia de calor. El serpentín se encuentra instalado dentro de un recipiente con agua, la cual actúa como medio de enfriamiento al absorber el calor de los vapores que circulan por su interior.

El sistema de enfriamiento es de tipo cerrado e incorpora una bomba de agua para la recirculación constante del líquido refrigerante, en este caso, agua. Durante la destilación, los vapores se enfrían progresivamente en el serpentín hasta condensarse y ser recolectados en forma líquida, controlando el flujo del destilado y manteniendo la estabilidad del proceso, con renovación periódica del agua para evitar la acumulación de calor.

Figura 55

Sistema de condensación mediante serpentín de cobre.



Fuente: (Autores)

2.18 Control de temperatura durante la destilación

El control de la temperatura durante la destilación es un factor crítico, debido a que incide directamente en la eficiencia de separación de los componentes volátiles y en la calidad del destilado obtenido. En el caso del bioetanol, es fundamental mantener la temperatura dentro de un rango adecuado que permita la evaporación preferencial del etanol, evitando la vaporización excesiva de agua u otros compuestos no deseados.

En este procedimiento experimental, la destilación se inició cuando la temperatura alcanzó aproximadamente 78 °C, valor cercano al punto de ebullición del etanol, y se mantuvo un monitoreo constante hasta alcanzar alrededor de 95 °C al final del proceso. Durante la operación, el seguimiento continuo de la temperatura permitió realizar ajustes en la fuente de calor, evidenciándose que incrementos excesivos de la llama generaban una producción elevada de vapor y dificultaban el control del proceso.

Por esta razón, se trabajó con una llama baja y controlada, lo que permitió mantener una evaporación estable, favorecer una condensación eficiente y obtener el destilado de manera gradual. Este control térmico contribuyó a un proceso de destilación más seguro, eficiente y repetible, asegurando condiciones adecuadas para la recuperación del bioetanol.

Figura 56

Monitoreo de la temperatura durante la destilación del fermentado.



Fuente: (Autores)

La siguiente tabla presenta las principales etapas del proceso de destilación, junto con los rangos de temperatura, la condición de la llama y las observaciones registradas.

Tabla 8

Etapas del proceso de destilación y condiciones operativas

| Etapas del proceso | Temperatura (°C) | Condición de la llama | Observaciones |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------------|--|
| Inicio de la destilación | 78 | Llama baja | Inicio de la evaporación del etanol |
| Desarrollo de la destilación | 80 – 85 | Llama baja controlada | Destilación estable, salida del destilado gota a gota |
| Etapas intermedia | 85 – 90 | Llama baja | Incremento gradual de la temperatura, condensación eficiente |
| Etapas final de la destilación | 90 – 95 | Llama baja | Mayor presencia de vapor, se mantiene control para evitar arrastre |
| Finalización del proceso | ≈ 95 | Llama reducida | Disminución del rendimiento del destilado |

2.19 Procedimiento general de destilación

El procedimiento general de destilación se llevó a cabo con el fin de separar y recuperar los componentes volátiles presentes en los fermentados obtenidos a partir de papa, yuca y caña de azúcar. Para ello, se empleó un alambique diseñado y ensamblado de manera experimental, el cual estuvo compuesto por una olla metálica como recipiente de calentamiento, un sistema de conducción de vapores y un serpentín de cobre acoplado a un sistema de condensación.

Previo al inicio de la destilación, los fermentados fueron sometidos a un proceso de colado, con el fin de separar los sólidos remanentes y evitar posibles obstrucciones o sobrecalentamientos durante la operación. Una vez filtrados, los volúmenes de fermentado introducidos al sistema fueron los siguientes: 16 L para el caso de yuca, 19 L para el caso de papa y 20 L para el caso de caña de azúcar.

Posteriormente, el fermentado líquido fue transferido a la olla del alambique artesanal, asegurando una correcta disposición del sistema de conducción de vapores hacia el serpentín de condensación. El calentamiento del sistema se realizó de manera progresiva desde temperatura ambiente, con el propósito de evitar choques térmicos y permitir un control adecuado del proceso.

Figura 57

Visualización de carga del fermentado en la olla destiladora.



Fuente: (Autores)

La destilación se inició alrededor de los 78 °C con la evaporación de los componentes más volátiles, cuyos vapores fueron conducidos al serpentín de cobre para su condensación y recolección continua del destilado. El proceso se mantuvo bajo control mediante la regulación de la llama y se dio por finalizado al alcanzar aproximadamente 95 °C, cuando se evidenció una disminución en la eficiencia de recuperación.

2.20 Recolección del destilado

La recolección del destilado se realizó de manera controlada con el fin de asegurar una adecuada recuperación del producto obtenido durante la destilación. El destilado condensado fue recolectado gota a gota en una olla pequeña, seleccionada por su resistencia térmica y facilidad de limpieza, lo que permitió observar directamente el comportamiento del proceso y controlar el volumen recolectado mediante el cambio del recipiente cuando fue necesario.

La recolección se efectuó de forma independiente para cada biomasa estudiada, garantizando la correcta diferenciación de las muestras. Una vez finalizada la destilación, los destilados se dejaron enfriar a temperatura ambiente antes de su manipulación, asegurando condiciones adecuadas de seguridad y preservación del producto.

Figura 58

Recolección del destilado durante el proceso de destilación.



Fuente: (Autores)

2.21 Repetición del proceso de destilado

Con el objetivo de incrementar la concentración alcohólica y mejorar la pureza del destilado, el proceso de destilación fue repetido en tres ocasiones para cada biomasa estudiada: papa, yuca y caña de azúcar. La repetición del procedimiento permitió obtener un destilado de mayor calidad y homogeneidad, optimizando sus características finales.

Para esta etapa se utilizó como materia prima el destilado obtenido previamente, el cual fue sometido nuevamente al proceso de destilación bajo condiciones controladas. Cada biomasa fue procesada de forma independiente, evitando la mezcla de muestras y garantizando una correcta identificación y comparación de los resultados obtenidos.

El procedimiento se realizó empleando el mismo equipo y configuración experimental, con un ajuste en la intensidad de la llama para lograr un calentamiento más gradual. Durante cada ciclo se efectuó un monitoreo constante de la temperatura y del volumen recolectado, lo que permitió una destilación más estable y controlada.

2.22 Destilación del fermentado de papa

2.22.1 Preparación y carga del fermentado en el destilador

Una vez finalizada la etapa de fermentación del mosto de papa, el producto obtenido fue transferido directamente al equipo de destilación sin ningún tipo de filtrado o tratamiento previo, es decir, se introdujo al destilador en el mismo estado en que salió del proceso de fermentación. Este procedimiento se realizó con el objetivo de conservar todas las características del fermentado y evaluar su comportamiento real durante la destilación.

El fermentado ingresó al destilador a temperatura ambiente. Posteriormente, el sistema fue cerrado de manera hermética para evitar pérdidas de vapor durante el calentamiento y asegurar que todo el alcohol generado sea conducido correctamente hacia el sistema de condensación. El cierre adecuado del equipo es esencial para garantizar la eficiencia del proceso y la correcta recolección del destilado.

2.22.2 Primera destilación del fermentado de papa

Para la primera destilación del fermentado de papa, se cargó un volumen inicial de 19 L dentro del equipo de destilación. El fermentado ingresó al sistema a temperatura ambiente y, una vez cargado, el destilador fue cerrado herméticamente para evitar fugas de vapor durante el calentamiento y asegurar una correcta conducción de este hacia el sistema de condensación.

Posteriormente, se aplicó calor mediante una cocina a gas hasta alcanzar la temperatura necesaria para que el alcohol presente en el fermentado comenzara a evaporarse. Durante todo el proceso se realizó un monitoreo constante de la temperatura interna del sistema mediante el termómetro incorporado al equipo, lo que permitió controlar el comportamiento del proceso y evitar sobrecalentamientos innecesarios.

El vapor generado fue conducido a través del serpentín de cobre, donde se produjo su condensación, obteniéndose así el destilado en estado líquido. El producto fue recolectado en un solo recipiente, sin realizar separación de fracciones, debido a que el bioetanol obtenido tiene fines exclusivamente automotrices.

El volumen final obtenido luego de esta primera destilación fue de 10 L.

Figura 59

Proceso de destilación del fermentado de papa.



Fuente: (Autores)

2.22.2.1 Determinación del porcentaje de alcohol de la primera destilación fermentado de papa mediante densidad

Para la determinación del porcentaje de alcohol del destilado obtenido, se empleó el método indirecto basado en la medición de la densidad del líquido y su posterior conversión a concentración alcohólica mediante una gráfica de referencia. Este procedimiento fue aplicado a los destilados de las tres biomásas (papa, yuca y caña de azúcar); sin embargo, a continuación, se detalla de manera completa el primer cálculo realizado, correspondiente a la primera destilación del fermentado de papa.

El procedimiento se inició utilizando una probeta graduada y una balanza de precisión. En primer lugar, se colocó la probeta vacía sobre la balanza y se procedió a tararla (encerarla), con el fin de eliminar el peso propio del recipiente y considerar únicamente la masa del líquido a analizar.

Posteriormente, se vertió en la probeta un volumen exacto de 100 ml de destilado, cuidando que la lectura se realice correctamente al nivel del menisco. Una vez alcanzado este volumen, se registró la masa correspondiente a dicha muestra.

Figura 60

Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la primera destilación de papa.



Fuente: (Autores)

En este caso, la masa medida para los 100 mL de destilado fue de 93 g. Con estos datos, se procedió a calcular la densidad de la muestra empleando la expresión:

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

Donde:

ρ = densidad (g/ml)

m = masa (g)

V = volumen (ml)

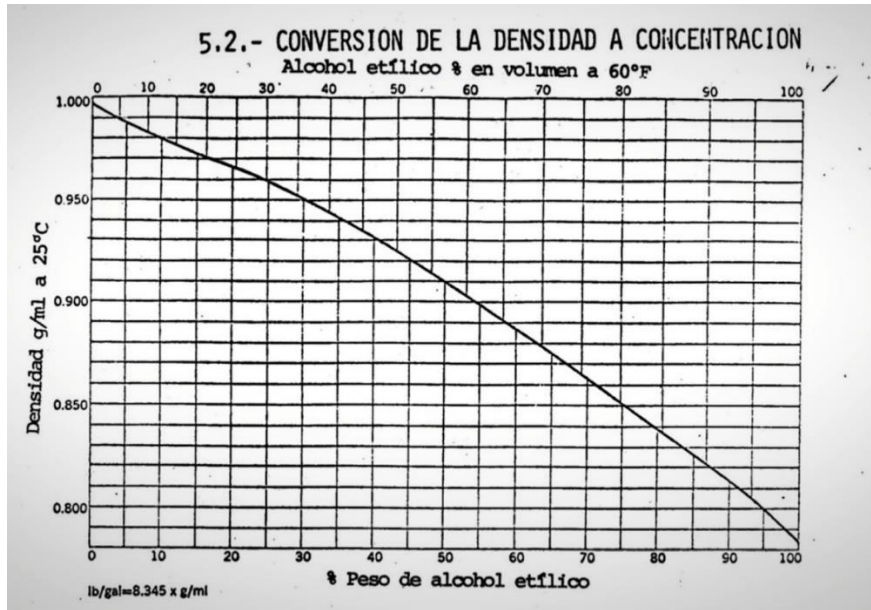
$$\rho = \frac{93 \text{ g}}{100 \text{ ml}}$$

$$\rho = 0.93 \text{ g/ml}$$

Una vez determinada la densidad, este valor fue ubicado en la gráfica de conversión densidad–concentración de alcohol etílico. Para ello, se toma el valor de densidad en el eje vertical, se traza una línea horizontal hasta interceptar la curva de conversión y, desde ese punto, se proyectó una línea vertical hacia el eje horizontal, donde se obtuvo el porcentaje de alcohol correspondiente.

Figura 61

Gráfica de conversión densidad–concentración de alcohol etílico.



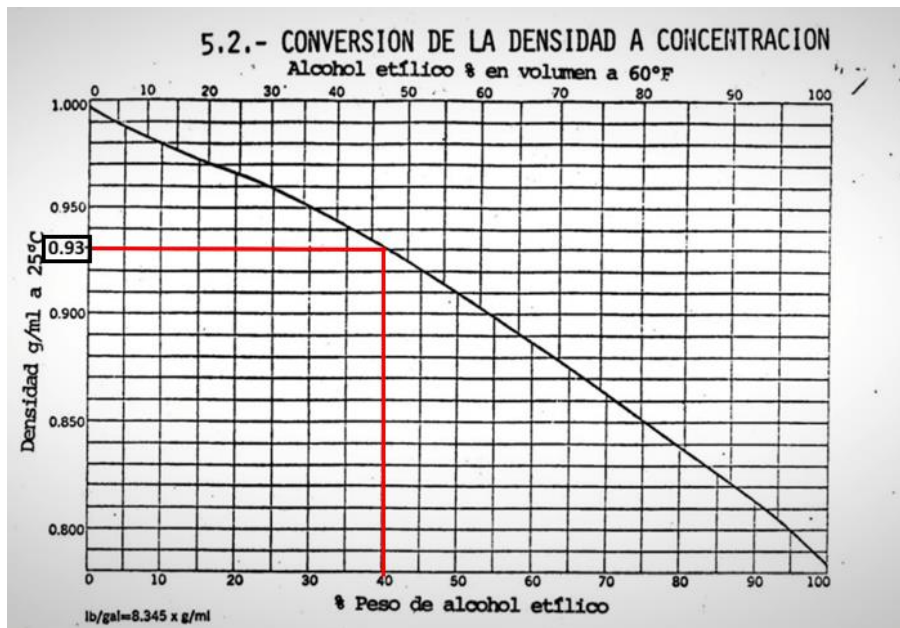
Fuente: (HRom, 2025)

En la gráfica se ubica la densidad obtenida y mediante cruce de líneas, se obtiene el porcentaje en peso de alcohol etílico, tal como se puede ver en la siguiente imagen:

Figura 62

Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.

Biomasa: Papa – Primera destilación



Fuente: (Autores)

A partir de este procedimiento gráfico, se obtuvo el porcentaje volumétrico de alcohol presente en la muestra, el cual corresponde aproximadamente a 40 % en peso de alcohol etílico. Este mismo procedimiento fue aplicado en las destilaciones posteriores y para los destilados de las otras biomásas, variando únicamente los valores de masa registrados, los cuales se presentan en los apartados correspondientes.

Dado que este valor de concentración se considera bajo para los objetivos del proyecto, se procedió a realizar una segunda destilación, con el fin de incrementar la pureza del etanol obtenido y mejorar la separación entre el alcohol y el agua, acercándose progresivamente a las condiciones requeridas para su aplicación como biocombustible.

2.22.3 Segunda destilación de la papa

Una vez finalizada la primera destilación del fermentado de papa, se procedió a realizar una segunda destilación con el objetivo de incrementar la concentración de alcohol del destilado obtenido. Para esta etapa, el producto de la primera destilación fue cargado nuevamente en el destilador, sin realizar modificaciones en el equipo ni en la configuración general del sistema.

El proceso de destilación se desarrolló siguiendo el mismo procedimiento descrito previamente, que comprende las etapas de calentamiento del líquido, evaporación de los componentes volátiles, conducción del vapor a través del sistema, condensación y recolección del destilado en un recipiente único. Durante todo el proceso se realizó un monitoreo constante de la temperatura interna del sistema, con el fin de mantener condiciones estables de operación y asegurar una correcta separación de fases.

Esta segunda destilación permitió una nueva separación entre el alcohol y el agua, favoreciendo el incremento progresivo de la pureza del bioetanol obtenido. Obteniendo así una cantidad de destilado final de 6 litros.

Figura 63

Carga del destilado en el equipo para segunda destilación.



Fuente: (Autores)

Figura 64

Recolección del segundo destilado.



Fuente: (Autores)

2.22.3.1 Determinación del porcentaje de alcohol de la segunda destilación de papa

Una vez finalizada la segunda destilación del fermentado de papa, se procedió a determinar el porcentaje de alcohol del destilado obtenido mediante el método de medición de densidad, siguiendo el mismo procedimiento general descrito anteriormente.

Para ello, se procedió a tomar una muestra de 100 mL del destilado y se registró su masa utilizando una balanza de precisión, obteniéndose un valor de 90 g. Con este dato, se calculó la densidad correspondiente y se procedió a ubicar dicho valor en la gráfica de conversión densidad–concentración de alcohol etílico.

A partir de esta gráfica, se trazaron las líneas de referencia necesarias hasta interceptar la curva de conversión, permitiendo así obtener el porcentaje volumétrico de alcohol presente en la muestra.

Figura 65

Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la segunda destilación de papa

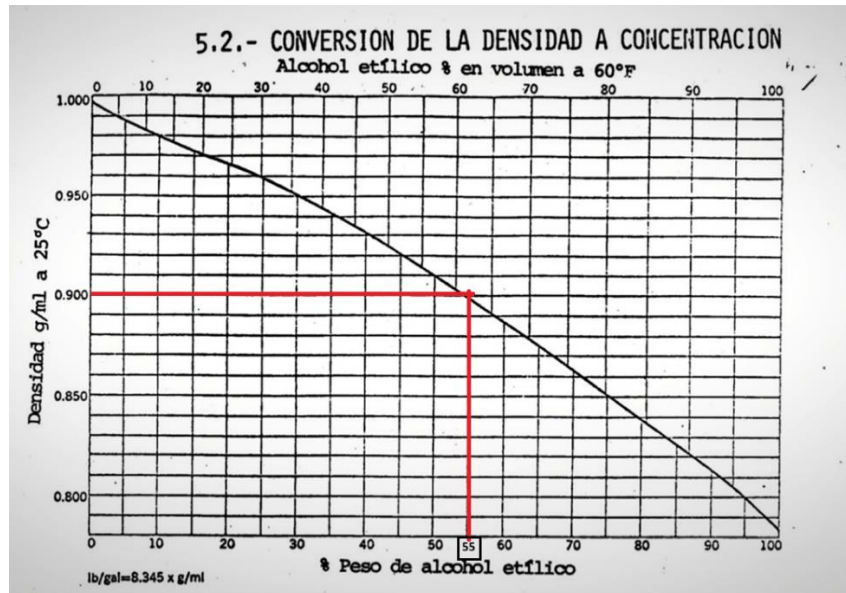


Fuente: (Autores)

Figura 66

Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.

Biomasa: Papa – Segunda destilación



Fuente: (Autores)

Mediante este procedimiento, se determinó que el destilado de la segunda destilación presenta un porcentaje de alcohol aproximado de 55 % en peso de alcohol etílico, evidenciando un incremento con respecto a la primera destilación. Sin embargo, este valor aún es insuficiente para el encendido eficiente del motor de combustión interna, por lo que se procede a realizar una tercera destilación con el objetivo de incrementar la concentración de etanol y acercarse a los valores requeridos para su correcta combustión.

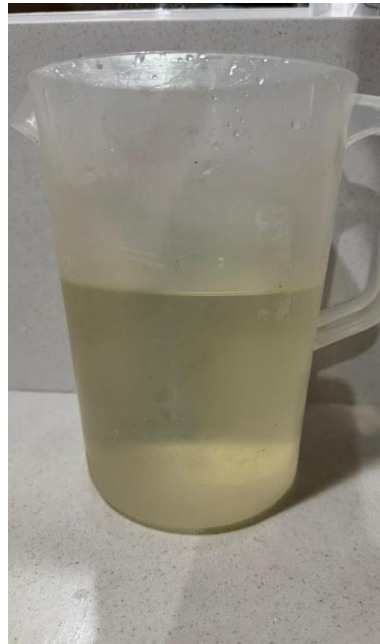
2.22.4 Tercera destilación de la papa

Con el objetivo de aumentar aún más la concentración de etanol en el destilado, se procedió a realizar una tercera destilación, debido a que los valores obtenidos en las etapas anteriores no fueron suficientes para garantizar un encendido eficiente del motor de combustión interna.

Este proceso se ejecutó manteniendo las mismas condiciones operativas, manteniendo el control de temperatura y el sistema de condensación, con el fin de asegurar la separación adecuada del alcohol presente en la mezcla. Esta destilación dio como resultado 2L de destilado.

Figura 67

Cantidad de destilado obtenido tras tercera destilación de papa



Fuente: (Autores)

2.22.4.1 Determinación del porcentaje de alcohol de la tercera destilación de papa

Para la tercera destilación, se tomó una muestra de 100 ml, la cual presentó una masa de 83g, registrada mediante una balanza digital. A partir de este valor, se procedió a ubicar el punto correspondiente en la gráfica de correlación entre densidad y porcentaje de alcohol.

Según la interpolación realizada en dicha gráfica, se determinó que el destilado obtenido en esta etapa presenta un porcentaje de alcohol aproximado de 84 % en peso de alcohol etílico, evidenciando un incremento significativo con respecto a las destilaciones anteriores.

Figura 68

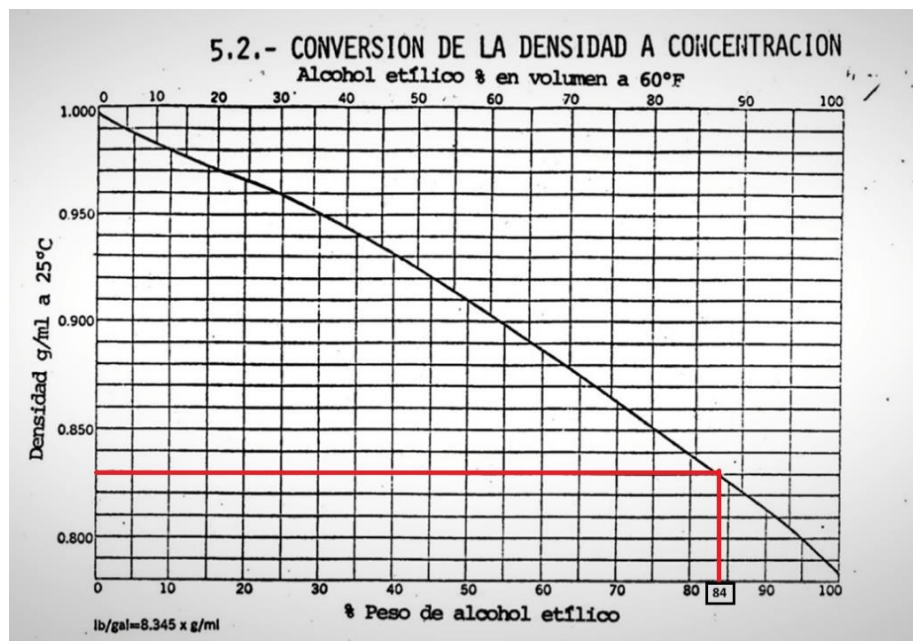
Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la tercera destilación de papa.



Fuente: (Autores)

Figura 69

*Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.
Biomasa: Papa – Tercera destilación*



Fuente: (Autores)

Este valor se considera adecuado para su uso como combustible experimental en el motor de combustión interna, debido a su mayor capacidad de inflamación y mejor comportamiento en el proceso de encendido.

2.22.5 Tabla resumen de las destilaciones de la biomasa de papa

Tabla 9

Resumen de las destilaciones del bioetanol obtenido a partir de papa

| Destilación | Volumen inicial (L) | Volumen final (L) | (%) Peso de alcohol etílico |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Primera | 19 | 10 | 40 |
| Segunda | 10 | 6 | 55 |
| Tercera | 6 | 2 | 84 |

Como se observa en la Tabla 9, a medida que se realizaron destilaciones sucesivas, el volumen del destilado disminuyó progresivamente, mientras que el porcentaje de alcohol aumentó de manera significativa. En la primera destilación se obtuvo un destilado con una concentración aproximada de 40 % en peso de alcohol etílico, valor relativamente bajo para aplicaciones energéticas. Posteriormente, en la segunda destilación, la concentración aumentó hasta aproximadamente 55 % en peso de alcohol etílico, evidenciando el efecto de la redestilación en el enriquecimiento del contenido alcohólico. Finalmente, en la tercera destilación se alcanzó una concentración de 84 % en peso de alcohol etílico, lo que demuestra un incremento considerable respecto a las etapas anteriores, aunque con una reducción importante del volumen final recuperado. Este comportamiento confirma que el proceso de destilación permite concentrar el alcohol a costa de una disminución progresiva del volumen, debido a la separación de componentes no volátiles y a las pérdidas propias del proceso.

2.23 Destilación del mosto fermentado de caña de azúcar

La destilación del fermentado de caña de azúcar se realizó siguiendo el mismo procedimiento general explicado para el fermentado de papa, utilizando el mismo equipo, condiciones de operación y metodología de trabajo. El proceso consistió en la carga del fermentado, calentamiento, evaporación del alcohol, conducción del vapor, condensación y recolección del destilado.

Se llevaron a cabo tres destilaciones sucesivas con el objetivo de incrementar progresivamente la concentración de alcohol, realizando mediciones de volumen y determinación del porcentaje alcohólico después de cada etapa. Todo el procedimiento fue documentado mediante registros fotográficos.

2.23.1 Primera destilación del fermentado de caña de azúcar

La primera destilación del fermentado de caña de azúcar se realizó siguiendo el mismo procedimiento aplicado en la biomasa de papa, utilizando el mismo equipo y condiciones generales de operación. Para esta etapa, se cargaron 20 L de fermentado directamente en el destilador, el cual fue cerrado herméticamente para evitar pérdidas de vapor durante el calentamiento.

Posteriormente, se aplicó calor mediante una cocina a gas hasta alcanzar la temperatura necesaria para la evaporación del alcohol presente en la mezcla. Los vapores generados fueron conducidos a través del serpentín de cobre, donde se enfriaron mediante agua y se condensaron, obteniéndose el destilado líquido.

El producto obtenido fue recolectado en un recipiente limpio y debidamente rotulado. Al finalizar esta primera destilación, se obtuvo un volumen aproximado de 10,8 L de destilado, el cual fue reservado para su posterior análisis de concentración alcohólica y para la siguiente destilación.

Figura 70

Proceso de destilación del fermentado de caña de azúcar



Fuente: (Autores)

Figura 71

Cantidad de destilado obtenido tras primera destilación de caña de azúcar



Fuente: (Autores)

2.23.1.1 Determinación del porcentaje de alcohol de primera destilación del fermentado de caña de azúcar

Una vez finalizada la primera destilación del fermentado de caña de azúcar, se procedió a determinar el porcentaje de alcohol del destilado mediante el método de densidad, empleando una probeta y una balanza de precisión. Para ello, se midió una muestra de 100 ml, cuya masa registrada fue de 92 g.

Con este valor, se obtuvo la densidad correspondiente y, mediante el uso de la gráfica de conversión densidad–concentración, se determinó que el destilado presenta un contenido aproximado de 45 % en peso de alcohol etílico.

Figura 72

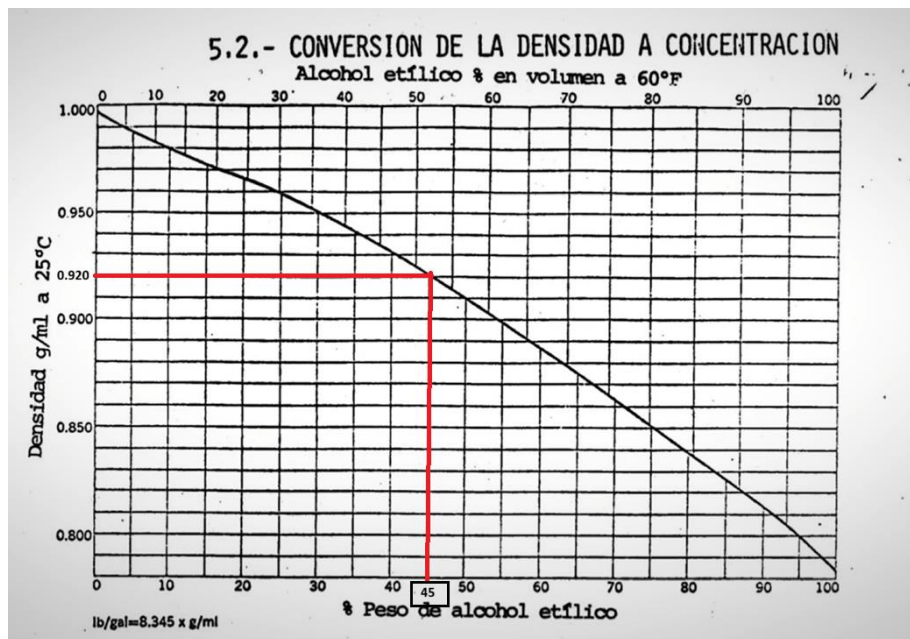
Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la primera destilación de caña de azúcar.



Fuente: (Autores)

Figura 73

*Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.
Biomasa: Caña de azúcar – Primera destilación*



Fuente: (Autores)

Este resultado evidencia un incremento en la concentración alcohólica con respecto al fermentado inicial; sin embargo, aún se considera insuficiente para el encendido directo de un motor, por lo que se procedió a realizar una segunda destilación con el objetivo de aumentar la pureza del bioetanol.

2.23.2 Segunda destilación de caña de azúcar

El destilado obtenido en la primera destilación fue sometido a una segunda destilación con el objetivo de incrementar su concentración alcohólica. Para este proceso se empleó un volumen inicial de 10,8 L, el cual, tras completarse la destilación, se redujo a un volumen final de 5,3 L. Durante esta etapa se mantuvo el mismo procedimiento general descrito anteriormente, controlando la temperatura mediante el termómetro del equipo y recolectando el destilado en un único recipiente correspondiente a esta biomasa.

Figura 74

Cantidad de destilado obtenido tras segunda destilación de caña de azúcar



Una vez finalizada esta segunda destilación, se procedió a determinar nuevamente el porcentaje de alcohol del producto obtenido, con el fin de evaluar el aumento de pureza antes de continuar con una tercera destilación.

2.23.2.1 Determinación del porcentaje de alcohol de la segunda destilación de caña de azúcar

Para la segunda destilación del fermentado de caña de azúcar, se tomó una muestra de 100 mL del destilado obtenido y se procedió a determinar su masa mediante una balanza de precisión. El valor registrado fue de 88 g.

Con base en este valor de masa y utilizando la gráfica de conversión densidad–concentración alcohólica, se determinó que el destilado presenta un porcentaje de alcohol aproximado de 64 % en peso de alcohol etílico, evidenciando un incremento significativo con respecto a la primera destilación.

Figura 75

Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la segunda destilación de caña de azúcar

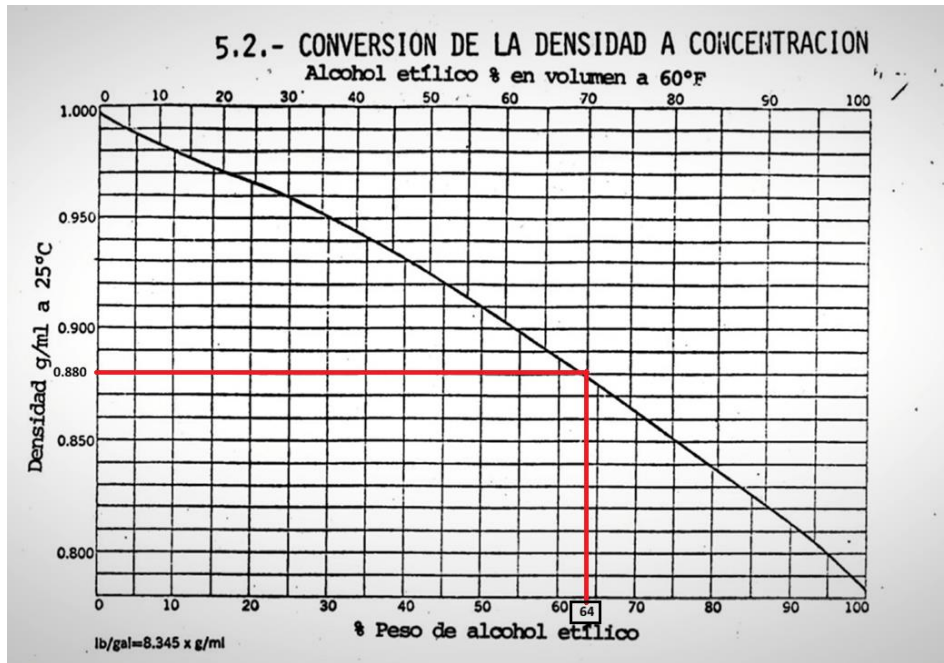


Fuente: (Autores)

Figura 76

Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.

Biomasa: Caña de azúcar – Segunda destilación



Fuente: (Autores)

No obstante, este porcentaje aún se considera insuficiente para el objetivo del proyecto, que es la obtención de bioetanol con elevada pureza, adecuado para su aplicación en motores de combustión interna, por lo que se procedió a realizar una tercera destilación.

2.23.3 Tercera destilación de caña de azúcar

El destilado obtenido en la segunda destilación del fermentado de caña de azúcar fue sometido a una tercera destilación, con el objetivo de incrementar aún más la concentración alcohólica y alcanzar un mayor grado de pureza, acorde a los requerimientos del proyecto.

Para esta etapa se empleó un volumen inicial de 5,3 L del destilado proveniente de la segunda destilación, el cual, una vez completado el proceso, se redujo a un volumen final de 2,8 L. La destilación se llevó a cabo manteniendo el mismo procedimiento general descrito en las etapas anteriores, utilizando el mismo equipo experimental y condiciones de operación.

Figura 77

Cantidad de destilado obtenido tras tercera destilación de caña de azúcar



Fuente: (Autores)

Una vez finalizada la tercera destilación, se procedió a la determinación del porcentaje de alcohol del destilado obtenido, con el propósito de evaluar si el producto final cumplía con el objetivo del proyecto en términos de concentración y pureza alcohólica.

2.23.3.1 Determinación del porcentaje de alcohol de la tercera destilación de caña de azúcar

Para la tercera destilación del fermentado de caña de azúcar, se tomó una muestra de 100 mL del destilado obtenido y se procedió a determinar su masa mediante el uso de una balanza de precisión. El valor registrado para dicha muestra fue de 81 g.

A partir del valor de masa obtenido y utilizando la gráfica de conversión densidad–concentración alcohólica, se determinó que el destilado presenta un porcentaje de alcohol aproximado de 91 % en peso de alcohol etílico. Este resultado evidencia un incremento significativo en la concentración alcohólica con respecto a la segunda destilación.

Figura 78

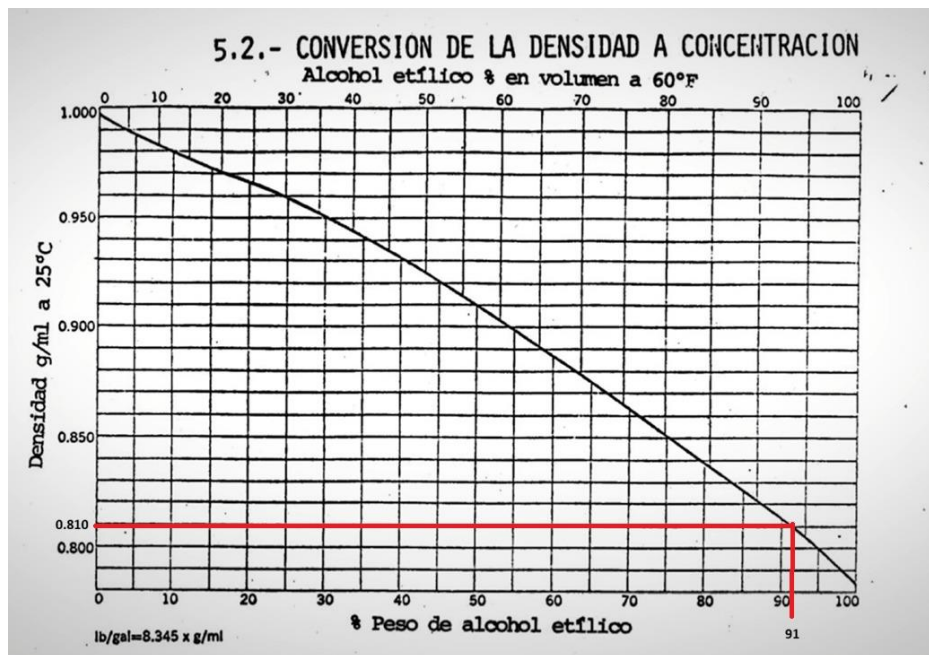
Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la tercera destilación de caña de azúcar.



Fuente: (Autores)

Figura 79

*Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.
Biomasa: Caña de azúcar – Tercera destilación*



Fuente: (Autores)

El porcentaje de alcohol alcanzado en esta tercera destilación cumple con el objetivo del proyecto, correspondiente a la producción de bioetanol de alta pureza para su aplicación en un motor de combustión interna, por lo que no fue necesario realizar una destilación adicional.

2.23.4 Tabla resumen de las destilaciones de la biomasa de caña de azúcar

Tabla 10

Resumen de las destilaciones del bioetanol producido a partir de la caña de azúcar.

| Destilación | Volumen inicial (L) | Volumen final (L) | (%) Peso de alcohol etílico |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Primera | 20 | 10.8 | 45 |
| Segunda | 10.8 | 5.3 | 64 |
| Tercera | 5.3 | 2.8 | 91 |

Como se aprecia en la Tabla 10, la realización de destilaciones sucesivas provocó una disminución progresiva del volumen del destilado, acompañada de un incremento significativo en la concentración alcohólica. En la primera destilación, se obtuvo un destilado con una concentración aproximada de 45 % en peso de alcohol etílico, valor que resulta limitado para aplicaciones energéticas. Posteriormente, durante la segunda destilación, la concentración alcohólica aumentó hasta aproximadamente 64 % en peso de alcohol etílico, lo que evidencia la efectividad del proceso de redestilación en el enriquecimiento del contenido de alcohol. Finalmente, en la tercera destilación, se alcanzó una concentración de 91 % en peso de alcohol etílico, representando un aumento considerable con respecto a las etapas anteriores, aunque acompañado de una reducción notable en el volumen final recuperado. Este comportamiento confirma que la destilación sucesiva permite concentrar el alcohol presente en el destilado, a costa de una disminución progresiva del volumen.

2.24 Destilación del fermentado de la yuca

La destilación del fermentado de yuca se realizó siguiendo el mismo procedimiento general descrito para el fermentado de papa, utilizando el mismo equipo, condiciones de operación y metodología de trabajo. El proceso consistió en la carga del fermentado, calentamiento, evaporación del alcohol, conducción del vapor, condensación y recolección del destilado.

Se llevaron a cabo tres destilaciones sucesivas con el objetivo de incrementar progresivamente la concentración de alcohol, realizando mediciones de volumen y determinación del porcentaje alcohólico después de cada etapa. Todo el procedimiento fue documentado mediante registros fotográficos.

2.24.1 Primera destilación del fermentado de la yuca

El fermentado de yuca fue sometido a una primera destilación con el objetivo de obtener el destilado inicial y evaluar su contenido alcohólico. Para esta etapa, se cargaron 16 L de fermentado directamente en el destilador, se empleó el fermentado previamente preparado y filtrado, el cual fue introducido en el alambique artesanal, siguiendo el procedimiento general descrito en los apartados anteriores.

La destilación se llevó a cabo a través de un calentamiento progresivo del sistema, controlando la temperatura durante todo el proceso con el fin de favorecer la evaporación del alcohol presente en el fermentado. Los vapores generados fueron conducidos hacia el sistema de condensación, donde se enfriaron y se recuperaron en forma líquida.

Como resultado de esta primera destilación, se obtuvo un volumen total de 8 L de destilado, el cual fue recolectado en un recipiente correspondiente exclusivamente a esta biomasa. Durante el proceso se mantuvo un control continuo de las condiciones operativas, asegurando una destilación estable y uniforme.

Figura 80

Proceso de destilación del fermentado de la yuca.



Fuente: (Autores)

Figura 81

Cantidad de destilado obtenido tras primera destilación de fermentado de yuca.



Fuente: (Autores)

2.24.1.1 Determinación del porcentaje de alcohol de primera destilación de fermentado de yuca

Una vez finalizada la primera destilación del fermentado de yuca, se procedió a determinar el porcentaje de alcohol del destilado mediante el método de densidad, empleando una probeta y una balanza de precisión. Para ello, se procedió a tomar una muestra de 100 mL, cuya masa registrada fue de 94 g.

A partir de este valor se calculó la densidad correspondiente y, mediante el uso de la gráfica de conversión densidad–concentración alcohólica, se determinó que el destilado presenta un contenido aproximado de 35 % en peso de alcohol etílico.

Figura 82

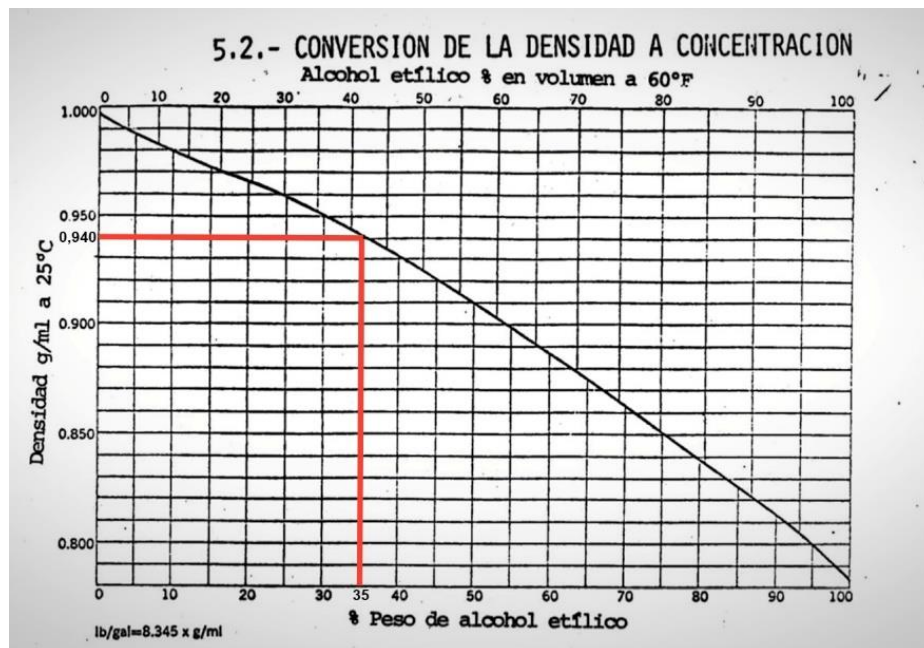
Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la primera destilación de yuca



Fuente: (Autores)

Figura 83

Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico. Biomasa: Yuca – Primera destilación.



Fuente: (Autores)

Este resultado evidencia un incremento en la concentración alcohólica con respecto al fermentado inicial; sin embargo, dicho porcentaje se considera bajo para los fines del proyecto, por lo que se procedió a realizar una segunda destilación con el objetivo de aumentar la concentración y la pureza del bioetanol obtenido.

2.24.2 Segunda destilación del fermentado de yuca

El destilado obtenido en la primera destilación del fermentado de yuca fue sometido a una segunda destilación con el objetivo de incrementar su concentración alcohólica. Para este proceso se empleó un volumen inicial de 8 L, el cual, una vez completada la destilación, se redujo a un volumen final de 4,7 L. Durante esta etapa se mantuvo el mismo procedimiento general descrito anteriormente, realizando un control continuo de la temperatura mediante el termómetro del equipo. El destilado obtenido fue recolectado de manera controlada en un único recipiente correspondiente a esta biomasa, garantizando la correcta separación y recuperación del producto.

Figura 84

Cantidad de destilado obtenido tras segunda destilación de yuca.



Fuente: (Autores)

Una vez finalizada esta segunda destilación, se dio inicio a determinar nuevamente el porcentaje de alcohol del producto obtenido, con el fin de evaluar el aumento de pureza antes de continuar con una tercera destilación.

2.24.2.1 Determinación del porcentaje de alcohol de la segunda destilación de yuca

Para la segunda destilación del fermentado de yuca, se tomó una muestra de 100 ml del destilado obtenido y se procedió a determinar su masa mediante una balanza de precisión, registrándose un valor de 87 g.

A partir de este valor de masa y utilizando la gráfica de conversión densidad–concentración alcohólica, se determinó que el destilado presenta un porcentaje de alcohol aproximado de 66 % en peso de alcohol etílico, lo que evidencia un incremento significativo en la concentración alcohólica con respecto a la primera destilación.

Figura 85

Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la segunda destilación de yuca

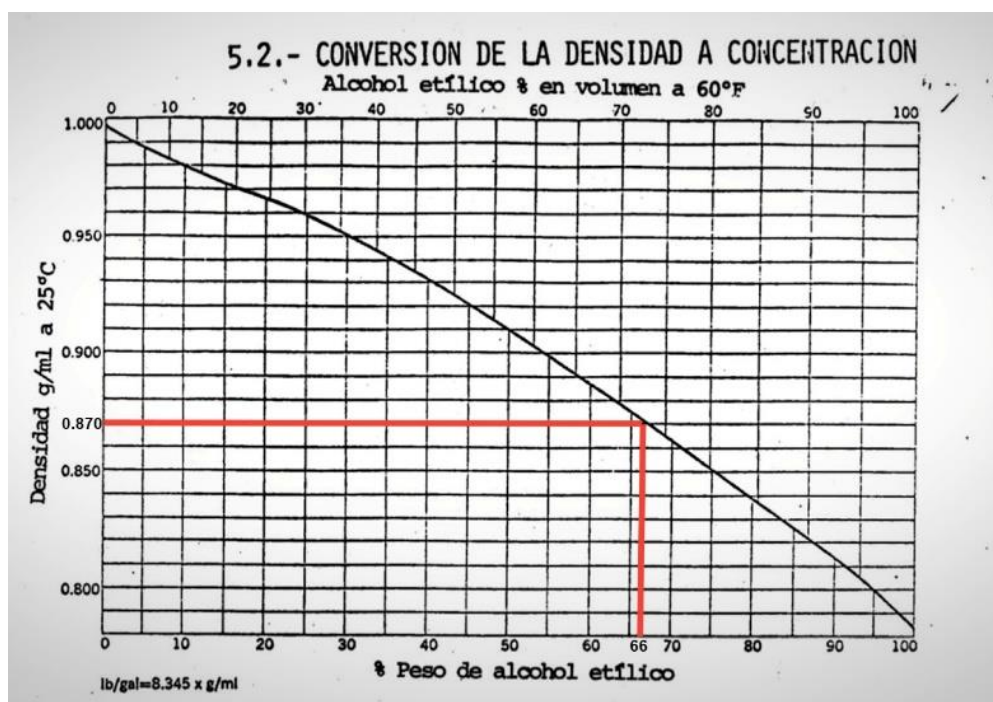


Fuente: (Autores)

Figura 86

Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.

Biomasa: Yuca – Segunda destilación.



Fuente: (Autores)

No obstante, este porcentaje aún se considera insuficiente para el objetivo del proyecto, que es la obtención de bioetanol en elevada pureza, lo que permite su aplicación en un motor de combustión interna, por lo que se procedió a realizar una tercera destilación.

2.24.3 Tercera destilación del fermentado de la yuca

El destilado obtenido en la segunda destilación del fermentado de caña de azúcar fue sometido a una tercera destilación, con el objetivo de incrementar aún más la concentración alcohólica y alcanzar un mayor grado de pureza, acorde a los requerimientos del proyecto.

Para esta etapa se empleó un volumen inicial de 4,7 L del destilado proveniente de la segunda destilación, el cual, una vez completado el proceso, se redujo a un volumen final de 1,5 L. La destilación se llevó a cabo manteniendo el mismo procedimiento general descrito en las etapas anteriores, utilizando el mismo equipo experimental y condiciones de operación.

A lo largo del proceso se efectuó un monitoreo continuo de la temperatura mediante el termómetro del sistema, con el fin de garantizar una destilación controlada y estable. El destilado obtenido fue recolectado en un solo recipiente, asignado exclusivamente a esta biomasa, asegurando así la identificación precisa y la trazabilidad correspondiente de la muestra.

Figura 87

Cantidad de destilado obtenido tras tercera destilación de yuca.



Fuente: (Autores)

Concluida la tercera destilación, se realizó la determinación del contenido alcohólico del producto final, con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos del proyecto. Los resultados evidenciaron que el destilado alcanza el objetivo propuesto, aunque su desempeño resulta menos eficiente en comparación con otras biomásas analizadas, principalmente debido a la marcada disminución del volumen recuperado.

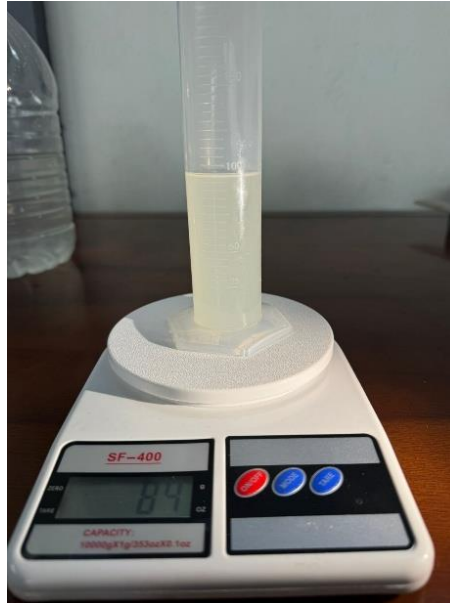
2.24.3.1 Determinación del porcentaje de alcohol de la tercera destilación

Para la tercera destilación del fermentado de yuca, se extrajo una muestra de 100 ml del destilado final, cuya masa fue determinada mediante una balanza de precisión, registrándose un valor de 84 g.

A partir de este resultado y empleando la gráfica de conversión densidad–concentración alcohólica, se estimó que el destilado presenta un contenido aproximado de 80 % en peso de alcohol etílico. Este valor evidencia un aumento en la concentración alcohólica en comparación con la segunda destilación.

Figura 88

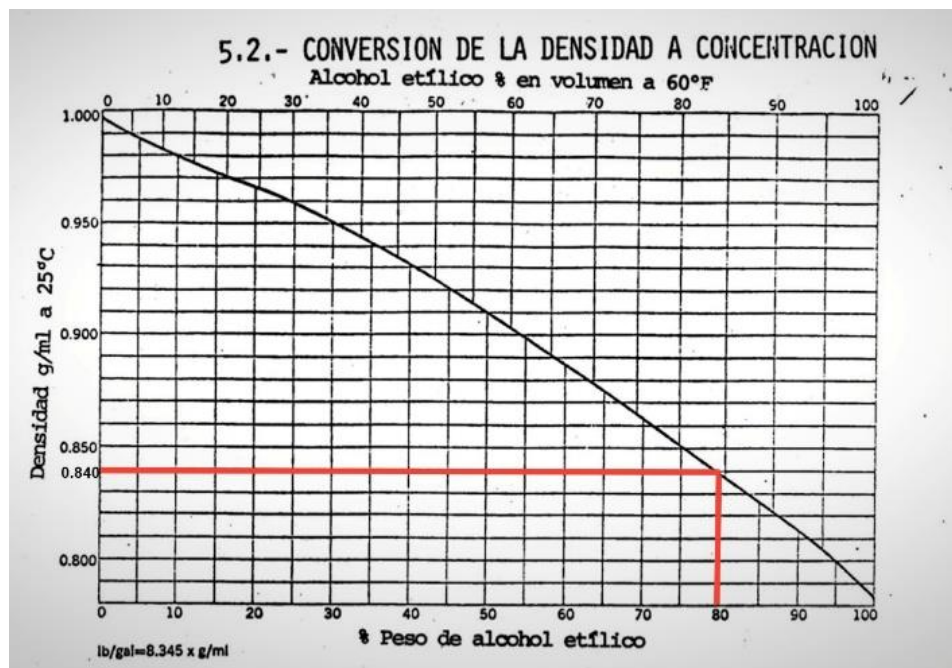
Medición de la masa de una muestra de 100 ml obtenida en la tercera destilación de yuca



Fuente: (Autores)

Figura 89

Conversión de densidad a concentración de alcohol etílico mediante método gráfico.
Biomasa: Yuca – Tercera destilación.



Fuente: (Autores)

Sin embargo, el resultado obtenido solo cumple parcialmente con el objetivo del proyecto, ya que, aunque se alcanzó un nivel elevado de pureza, la eficiencia global del proceso resultó limitada.

2.24.4 Tabla resumen de las destilaciones de la biomasa de la yuca

Tabla 11

Resumen de las destilaciones del bioetanol producido a partir de la yuca

| Destilación | Volumen inicial (L) | Volumen final (L) | (%) Peso de alcohol etílico |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Primera | 16 | 8 | 35 % |
| Segunda | 8 | 4.7 | 66 % |
| Tercera | 4.7 | 1.5 | 80 % |

En base con los resultados presentados en la Tabla 11, se observa que al realizar destilaciones sucesivas se produce una disminución progresiva del volumen recuperado, acompañada de un incremento notable en la concentración alcohólica. En la primera destilación, el destilado obtenido alcanzó una concentración aproximada de 35 % en peso de alcohol etílico, la cual resulta baja para aplicaciones de tipo energético.

Posteriormente, durante la segunda destilación, el contenido alcohólico aumentó hasta alrededor de 66 % en peso de alcohol etílico, lo que demuestra la efectividad del proceso de redestilación para concentrar el alcohol. Finalmente, en la tercera destilación se logró una concentración cercana al 80 % en peso de alcohol etílico, representando un aumento significativo respecto a las etapas previas, aunque con una reducción considerable del volumen final obtenido.

2.25 Cierre de la etapa de destilación

En este capítulo se implementó un procedimiento técnico para la producción de bioetanol a partir de biomasa agrícola de papa, yuca y caña de azúcar, mediante procesos de fermentación alcohólica y destilación sucesiva. A través de múltiples ciclos de destilación y el monitoreo de la concentración alcohólica por el método de densidad, se logró incrementar progresivamente la pureza del alcohol etílico obtenido, alcanzando concentraciones elevadas aptas para análisis posteriores y pruebas de encendido en motores de combustión interna.

La Tabla 12 resume los resultados finales correspondientes a la tercera destilación de cada biomasa, indicando el volumen recuperado y el porcentaje de alcohol alcanzado.

Tabla 12

Resumen final de la obtención de bioetanol por biomasa

| Biomasa | Volumen final obtenido (L) | (%) Peso de alcohol etílico |
|----------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Papa | 2.0 | 84 % |
| Yuca | 1.5 | 80 % |
| Caña de azúcar | 2.8 | 91 % |

Los bioetanoles obtenidos en esta etapa experimental constituyen las muestras base para el análisis comparativo de propiedades fisicoquímicas y las pruebas de funcionamiento en un motor de combustión interna. En el siguiente capítulo se presentan los procedimientos de caracterización en laboratorio, así como la evaluación del comportamiento del bioetanol en condiciones reales de uso, con el fin de determinar su viabilidad como combustible alternativo para aplicaciones automotrices.

3. ANÁLISIS COMPARATIVO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL BIOETANOL OBTENIDO

3.1 Enfoque general del capítulo

Este capítulo tiene como finalidad analizar comparativamente el bioetanol obtenido a partir de papa, yuca y caña de azúcar, mediante la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas en laboratorio y su comportamiento en pruebas experimentales de encendido en un motor de combustión interna. A diferencia de los capítulos anteriores, este apartado se enfoca en la interpretación de resultados, el análisis funcional del combustible y su posible aplicación automotriz.

Asimismo, se presentan los resultados experimentales obtenidos para cada biomasa, los cuales son comparados entre sí. Este análisis permite establecer criterios preliminares de viabilidad del bioetanol como sustituto o complemento de la gasolina convencional, considerando tanto sus propiedades como su capacidad de ignición y funcionamiento básico en el motor.

3.2 Equipos de laboratorio utilizados para la caracterización del bioetanol

Este apartado describe el equipo empleado para la caracterización fisicoquímica de las muestras de bioetanol obtenidas a partir de papa, yuca y caña de azúcar. La finalidad de esta etapa es registrar propiedades relevantes del combustible mediante instrumentación especializada, cuyos resultados serán utilizados posteriormente para el análisis comparativo y su aplicación automotriz.

Las mediciones fueron realizadas en un entorno de laboratorio, empleando un analizador basado en espectroscopía infrarroja, el cual permite obtener múltiples parámetros del combustible a partir de una sola muestra líquida.

3.2.1 Descripción general del laboratorio

Los análisis de las muestras de bioetanol fueron realizados en el Laboratorio de Tribología de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana. Este laboratorio está especializado en el estudio y caracterización de lubricantes, aceites y combustibles, mediante el uso de equipos de medición de alta precisión orientados al análisis de propiedades fisicoquímicas relevantes para aplicaciones automotrices.

El laboratorio cuenta con instrumentación adecuada para la evaluación de combustibles alternativos, lo que permite obtener datos confiables que sirven como base para estudios comparativos y validaciones experimentales. En este entorno se efectuaron las mediciones de las muestras de bioetanol obtenidas a partir de papa, yuca y caña de azúcar, garantizando condiciones controladas y procedimientos estandarizados.

Figura 90

Vista general del Laboratorio de Tribología de la Universidad Politécnica Salesiana.



Fuente: (Autores)

3.2.2 Equipos empleados para la medición de propiedades

Para la determinación de las muestras de bioetanol obtenidas a partir de papa, yuca y caña de azúcar, se empleó un equipo de análisis especializado, diseñado para la medición rápida y precisa de múltiples propiedades fisicoquímicas de combustibles líquidos. Este tipo de instrumentación permite obtener resultados confiables a partir de pequeños volúmenes de muestra, optimizando el tiempo de análisis y reduciendo posibles errores experimentales.

En este estudio se utilizó un único equipo, el cual integra tecnología de espectroscopía infrarroja por convertida de Fourier (FTIR), ampliamente empleada en el análisis de combustibles automotrices debido a su capacidad de identificar compuestos y estimar propiedades a partir de sus características espectrales.

3.2.2.1 Analizador ERASPEC FTIR Fuel

Para la caracterización de las muestras de bioetanol se empleó el analizador ERASPEC FTIR Fuel, un equipo especializado en el análisis rápido de combustibles líquidos mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Este tipo de tecnología permite identificar la composición del combustible y estimar diversas propiedades fisicoquímicas a partir de la interacción entre la radiación infrarroja y la muestra analizada.

El equipo cuenta con una interfaz táctil integrada que permite la visualización directa de los resultados de medición, así como con un sistema de conexión a computadora para la exportación y almacenamiento de datos. Esta característica facilita el registro digital de la información y su posterior procesamiento para fines comparativos y de análisis.

El ERASPEC FTIR Fuel está diseñado para aplicaciones en el sector automotriz y de combustibles, lo que lo lleva en una herramienta adecuada para la evaluación de combustibles alternativos como el bioetanol. Su uso en esta investigación permite obtener resultados consistentes y repetibles, fundamentales para la validación experimental del procedimiento desarrollado.

Figura 91

Vista frontal del analizador ERASPEC FTIR Fuel.



Fuente: (Solucioning, 2025)

3.2.2.2 Características generales del analizador ERASPEC FTIR Fuel

Tabla 13

Especificaciones generales del analizador ERASPEC Fuel.

| Característica | Descripción |
|--------------------------------------|---|
| Modelo | ERASPEC FTIR Fuel |
| Principio de medición | Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) |
| Tipo de muestra | Combustibles líquidos (etanol, gasolina, mezclas) |
| Cantidad de muestra requerida | ~10–100 mL (dependiente del método) |
| Interfaz de usuario | Pantalla táctil integrada |
| Salida de datos | Software de PC / exportación de resultados |
| Propiedades que puede estimar | Composición química, contenido de etanol/otros componentes (según calibraciones del software) |
| Conectividad | USB y/o conexión a PC para transferencia de datos |
| Rango de medición | Depende del método y calibración (determinado por software) |
| Precisión | Alta para análisis cualitativo y semicuantitativo (según calibración y tipo de combustible) |
| Aplicación principal | Análisis de combustibles y biocombustibles |

Fuente: (Eralytics GmbH, 2025)

3.3 Procedimiento general de análisis de las muestras

En este apartado se describe el procedimiento general seguido para el análisis de las muestras de bioetanol conseguidas a partir de las diferentes biomásas. Este procedimiento fue el mismo para todas las muestras, variando únicamente los valores obtenidos en cada medición.

3.3.1 Encendido del equipo

Se procedió al encendido del equipo de análisis, verificando que todos los sistemas electrónicos y la interfaz táctil funcionaran correctamente.

Figura 92

Equipo encendido



Fuente: (Autores)

3.3.2 Selección del tipo de combustible e ingreso de datos de referencia

En la interfaz del equipo se seleccionó inicialmente el tipo de combustible correspondiente al análisis, en este caso bioetanol. Sin embargo, se observó que bajo esta configuración el sistema no mostraba la totalidad de los parámetros requeridos para el estudio. Por esta razón, se procedió adicionalmente a configurar el equipo en el modo gasolina, lo que permitió obtener un mayor número de variables de interés para el análisis.

Figura 93

Selección del tipo de combustible.



Fuente: (Autores)

Luego se ingresaron los datos de identificación de la muestra, así como el código de referencia y el nombre del operador, para registrar adecuadamente cada medición.

Figura 94

Ingreso de datos.



Fuente: (Autores)

3.3.3 Colocación de la muestra y ejecución del análisis

La muestra de bioetanol fue colocada en una probeta, desde donde la manguera del analizador succionó el líquido para su posterior evaluación.

Figura 95

Probeta y manguera de succión del equipo.



Fuente: (Autores)

Una vez preparada la muestra, se inició el proceso de medición presionando el comando RUN en el equipo, dando comienzo al análisis automático.

3.3.4 Visualización de resultados

Los resultados obtenidos fueron visualizados en la pantalla del equipo y en el software instalado en el ordenador, permitiendo observar las propiedades medidas.

Figura 96

Visualización general de datos en el software Erasoft RCS.

| Date | Sample | S-Dens | RON | MON | Saturates | Aromatics | Olefinis | Oxygenates | Benzene | ETBE | Ethanol | Methanol | Warnings |
|------------|-------------------|--------|-------|------|-----------|-----------|----------|------------|---------|------|---------|----------|----------|
| 20.01.2026 | Etanol G Yuca | 0.8375 | 77.0 | 78.1 | 88.8 | 9.1 | 2.1 | 0 | | | | | IM |
| 20.01.2026 | Etanol G Papaa | 0.9833 | 79.6 | 79.0 | 88.3 | 8.8 | 2.8 | 0 | | | 0 | | IM |
| 20.01.2026 | Etanol G CANA | 0.842 | 80.8 | 80.0 | 80.5 | 6.3 | 6.3 | 4.97 | | | 4.58 | | IM |
| 20.01.2026 | aditivo bro | 0.8627 | 117.0 | 80.1 | 83.9 | 14.7 | 1.4 | 0 | | | | | IM |
| 20.01.2026 | Super_none | 0.7333 | 90.0 | 83.1 | 67.0 | 21.6 | 11.4 | 0 | 0.38 | | | | |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAB | 0.7384 | 95.1 | 88.6 | 67.7 | 5.9 | 0.5 | 25.9 | 0.13 | | 25.9 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAB | 0.7337 | 96.0 | 89.8 | 73.9 | 3.8 | 0.3 | 22.0 | 0.13 | | 22.0 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAT | 0.7382 | 94.8 | 88.3 | 69.6 | 5.2 | 0.5 | 24.8 | 0.14 | | 24.8 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAG | 0.7307 | 96.1 | 90.0 | 78.1 | 3.7 | 0.3 | 17.9 | 0.13 | | 17.9 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAS | 0.7282 | 95.6 | 89.8 | 80.3 | 3.9 | 0.5 | 15.3 | 0.13 | | 15.3 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAH | 0.7433 | 94.6 | 88.2 | 94.0 | 5.5 | 0.5 | 0 | 0.13 | | 0 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAJ | 0.7314 | 96.3 | 90.1 | 77.0 | 4.1 | 0.3 | 18.6 | 0.13 | | 18.6 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETA2 | 0.7234 | 95.2 | 89.6 | 82.8 | 4.4 | 2.8 | 9.94 | 0.15 | | 9.94 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETA1 | 0.724 | 95.2 | 89.7 | 83.3 | 4.2 | 2.8 | 9.6 | 0.15 | | 9.6 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERE1 | 0.7158 | 91.0 | 87.2 | 91.2 | 5.3 | 3.4 | 0 | 0.2 | | | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECO11 | 0.7258 | 88.6 | 83.2 | 82.7 | 7.0 | 6.6 | 3.72 | 0.33 | | 3.61 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECO10 | 0.7297 | 90.0 | 84.1 | 79.9 | 7.5 | 6.0 | 6.6 | 0.31 | | 6.48 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOBETA | 0.7264 | 88.1 | 82.9 | 82.8 | 7.4 | 6.5 | 3.19 | 0.33 | | 3.06 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOBETA | 0.7421 | 94.0 | 87.3 | 67.3 | 4.4 | 2.5 | 25.7 | 0.22 | | 25.7 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOFETA | 0.7371 | 92.7 | 86.0 | 71.6 | 4.9 | 3.0 | 20.4 | 0.25 | | 20.4 | | I |

Fuente: (Autores)

3.3.5 Exportación de datos

Finalmente, los datos obtenidos fueron exportados desde el software a la computadora en un archivo Excel para su almacenamiento y posterior análisis.

Figura 97

Visualización de los datos obtenidos en la computadora mediante Excel.

| Date | Sample | S-Dens | RON | MON | Saturates | Aromatics | Olefinis | Oxygenates | Benzene | ETBE | Ethanol | Methanol | Warnings |
|------------|-------------------|--------|-------|------|-----------|-----------|----------|------------|---------|------|---------|----------|----------|
| 20.01.2026 | aditivo bro | 0.8627 | 117.0 | 83.9 | 14.7 | 1.4 | | 0 | | | | | IM |
| 20.01.2026 | Super_none | 0.7333 | 90.0 | 83.1 | 67.0 | 21.6 | 11.4 | 0 | 0.38 | | | | |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAB | 0.7384 | 95.1 | 88.6 | 67.7 | 5.9 | 0.5 | 25.9 | 0.13 | | 25.9 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAB | 0.7337 | 96.0 | 89.8 | 73.9 | 3.8 | 0.3 | 22.0 | 0.13 | | 22.0 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAT | 0.7382 | 94.8 | 88.3 | 69.6 | 5.2 | 0.5 | 24.8 | 0.14 | | 24.8 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAG | 0.7307 | 96.1 | 90.0 | 78.1 | 3.7 | 0.3 | 17.9 | 0.13 | | 17.9 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAS | 0.7282 | 95.6 | 89.8 | 80.3 | 3.9 | 0.5 | 15.3 | 0.13 | | 15.3 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAH | 0.7433 | 94.6 | 88.2 | 94.0 | 5.5 | 0.5 | 0 | 0.13 | | 0 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETAJ | 0.7314 | 96.3 | 90.1 | 77.0 | 4.1 | 0.3 | 18.6 | 0.13 | | 18.6 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETA2 | 0.7234 | 95.2 | 89.6 | 82.8 | 4.4 | 2.8 | 9.94 | 0.15 | | 9.94 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERETA1 | 0.724 | 95.2 | 89.7 | 83.3 | 4.2 | 2.8 | 9.60 | 0.15 | | 9.60 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-SUPERE1 | 0.7158 | 91.0 | 87.2 | 91.2 | 5.3 | 3.4 | 0 | 0.20 | | | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECO11 | 0.7258 | 88.6 | 83.2 | 82.7 | 7.0 | 6.6 | 3.72 | 0.33 | | 3.61 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECO10 | 0.7297 | 90.0 | 84.1 | 79.9 | 7.5 | 6.0 | 6.60 | 0.31 | | 6.48 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOBETA | 0.7264 | 88.1 | 82.9 | 82.8 | 7.4 | 6.5 | 3.19 | 0.33 | | 3.06 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOBETA | 0.7421 | 94.0 | 87.3 | 67.3 | 4.4 | 2.5 | 25.7 | 0.22 | | 25.7 | | IM |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOFETA | 0.7371 | 92.7 | 86.0 | 71.6 | 4.9 | 3.0 | 20.4 | 0.25 | | 20.4 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOFETA | 0.7352 | 92.7 | 86.0 | 71.3 | 5.4 | 2.9 | 20.4 | 0.25 | | 20.4 | | I |
| 07.01.2026 | F-G-TP9-ECOFETA | 0.7318 | 91.3 | 85.1 | 77.8 | 5.8 | 3.5 | 12.9 | 0.29 | | 12.9 | | I |

Fuente: (Autores)

3.4 Propiedades medidas por el equipo ERASPEC FTIR Fuel

El equipo ERASPEC FTIR Fuel permite analizar distintas propiedades fisicoquímicas del combustible en función del método de medición seleccionado. Para este estudio se emplearon dos modos: *Ethanol* y *Gasoline*, ya que cada uno proporciona parámetros complementarios.

3.4.1 Parámetros obtenidos en el modo *Ethanol*

- **S-Dens (Densidad):** Indica la masa por unidad de volumen del combustible. Es un parámetro clave para estimar la pureza y el contenido de alcohol.
- **Methanol (Metanol):** Mide el porcentaje de metanol presente en la muestra. Su presencia no es deseada en bioetanol para motores, ya que puede afectar la combustión y generar corrosión.
- **Water (Agua):** Determina el contenido de agua en el combustible. Un exceso de agua reduce el poder calorífico y dificulta la ignición.
- **Denaturant (Desnaturalizante):** Indica la presencia de sustancias añadidas para impedir el consumo humano del etanol.
- **Ethanol (Etanol):** Mide el porcentaje volumétrico de etanol presente en la muestra. Representa uno de los parámetros fundamentales para evaluar su viabilidad como combustible.
- **Warnings (Advertencias):** Señala posibles inconsistencias, contaminaciones o valores fuera de rango detectados durante el análisis.

3.4.2 Parámetros obtenidos en el modo *Gasoline*

- **S-Dens (Densidad):** Permite comparar el bioetanol con combustibles comerciales.
- **RON (Research Octane Number):** Indica la resistencia del combustible a la detonación en condiciones de baja carga. Es fundamental para evaluar la calidad antidetonante.
- **MON (Motor Octane Number):** Mide la resistencia a la detonación bajo condiciones más severas de operación.

- **Saturates (Saturados):** Representa la fracción de hidrocarburos saturados presentes en el combustible.
- **Aromatics (Aromáticos):** Indica la presencia de compuestos aromáticos, que influyen en la combustión y las emisiones.
- **Olefins (Olefinas):** Mide la cantidad de hidrocarburos insaturados.
- **Oxygenates (Oxigenados):** Representa la presencia de compuestos oxigenados como el etanol, que mejoran la combustión.
- **Benzene (Benceno):** Mide el contenido de benceno, el cual es tóxico y regulado.
- **ETBE:** Detecta la presencia de etil-terc-butil éter, un aditivo oxigenado.
- **Ethanol (Etanol):** Determina el porcentaje de etanol dentro de la mezcla.
- **Methanol (Metanol):** Mide trazas de metanol.
- **Warnings (Advertencias):** Alertas generadas por el sistema.

3.4.3 Justificación del uso de ambos modos de medición (Ethanol & Gasoline)

El análisis se realizó empleando tanto el modo *Ethanol* como el modo *Gasoline* del equipo ERASPEC FTIR Fuel, debido a que cada uno proporciona distintos parámetros de interés. El modo *Ethanol* permitió obtener información específica sobre la pureza del alcohol, su contenido de agua, metanol y densidad. Sin embargo, este modo no entregó todas las propiedades necesarias para evaluar su comportamiento como combustible en motores.

Por esta razón, se utilizó también el modo *Gasoline*, el cual permitió obtener parámetros adicionales como el número de octano (RON y MON) y la composición química general, datos fundamentales para analizar el desempeño del bioetanol.

3.5 Resultados experimentales obtenidos a partir de muestras puras de cada biomasa

En esta sección se presentan los resultados del análisis realizado sobre las muestras de bioetanol producidas a partir de papa, yuca y caña de azúcar, mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel. Los datos corresponden a las propiedades fisicoquímicas y parámetros de calidad relevantes para su evaluación como combustible.

3.5.1 Resultados del bioetanol obtenido a partir de papa

En la Tabla 14 se muestran los resultados alcanzados en el bioetanol producido a partir de papa, los cuales corresponden a los análisis realizados mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel, empleando los modos *Ethanol* y *Gasoline*. Estos resultados permiten evaluar tanto la pureza del alcohol como parámetros asociados a su comportamiento como combustible.

Tabla 14

Resultados del análisis del bioetanol de papa

| Parámetro | Valor | Modo de medición |
|----------------------|--------------|-------------------------|
| Densidad (S-Dens) | 0.9858 | Ethanol |
| Metanol (%) | 55.3 | Ethanol |
| Agua (%) | 22.1 | Ethanol |
| Desnaturalizante (%) | 22.7 | Ethanol |
| Etanol (%) | 11 | Ethanol |
| Advertencias | U | Ethanol |
| Densidad (S-Dens) | 0.9833 | Gasoline |
| RON | 79.6 | Gasoline |
| MON | 79.0 | Gasoline |
| Saturados (%) | 88.3 | Gasoline |
| Aromáticos (%) | 8.8 | Gasoline |
| Olefinas (%) | 2.8 | Gasoline |
| Oxigenados (%) | 0 | Gasoline |
| Etanol (%) | 0 | Gasoline |
| Advertencias | IM | Gasoline |

Los resultados obtenidos para el bioetanol de papa muestran una alta densidad y un contenido significativo de alcohol, así como valores de RON y MON que permiten analizar su comportamiento frente a condiciones de pruebas de encendido de motor. Estos datos servirán como base para la comparación con las otras biomásas.

3.5.2 Resultados del bioetanol obtenido a partir de yuca

En la Tabla 15 se muestran los resultados alcanzados para el bioetanol producido a partir de yuca, correspondientes a los análisis realizados mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel, utilizando los modos *Ethanol* y *Gasoline*. Estos resultados permiten evaluar la composición del bioetanol y algunos parámetros relevantes para su análisis comparativo como combustible.

Tabla 15

Resultados del análisis del bioetanol de yuca

| Parámetro | Valor | Modo de medición |
|----------------------|--------------|-------------------------|
| Densidad (S-Dens) | 0.8514 | Ethanol |
| Metanol (%) | 17.0 | Ethanol |
| Agua (%) | 12.0 | Ethanol |
| Desnaturalizante (%) | 38.9 | Ethanol |
| Etanol (%) | 32.2 | Ethanol |
| Advertencias | U | Ethanol |
| Densidad (S-Dens) | 0.8375 | Gasoline |
| RON | 77.0 | Gasoline |
| MON | 78.1 | Gasoline |
| Saturados (%) | 88.8 | Gasoline |
| Aromáticos (%) | 9.1 | Gasoline |
| Olefinas (%) | 2.1 | Gasoline |
| Oxigenados (%) | 0 | Gasoline |
| Advertencias | M | Gasoline |

Los resultados del bioetanol obtenido a partir de yuca muestran una densidad menor en comparación con la biomasa de papa y valores de RON y MON inferiores, lo que indica un comportamiento distinto frente a la detonación. La presencia de agua y metanol influye directamente en la calidad del combustible, por lo que estos parámetros serán considerados en el análisis comparativo general.

3.5.3 Resultados del bioetanol producido a partir de caña de azúcar

En la Tabla 16 se muestran los resultados alcanzados para el bioetanol producido a partir de caña de azúcar, correspondientes a los análisis realizados mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel, utilizando los modos *Ethanol* y *Gasoline*. Estos resultados permiten evaluar tanto la pureza del bioetanol como su comportamiento potencial como combustible automotriz.

Tabla 16

Resultados del análisis del bioetanol de caña de azúcar

| Parámetro | Valor | Modo de medición |
|----------------------|--------------|-------------------------|
| Densidad (S-Dens) | 0.8398 | Ethanol |
| Metanol (%) | 7.0 | Ethanol |
| Agua (%) | 6.0 | Ethanol |
| Desnaturalizante (%) | 98.6 | Ethanol |
| Etanol (%) | 45.8 | Ethanol |
| Advertencias | U | Ethanol |
| Densidad (S-Dens) | 0.842 | Gasoline |
| RON | 80.8 | Gasoline |
| MON | 80.0 | Gasoline |
| Saturados (%) | 80.5 | Gasoline |
| Aromáticos (%) | 8.3 | Gasoline |
| Olefinas (%) | 6.3 | Gasoline |
| Oxigenados (%) | 4.97 | Gasoline |
| Etanol (%) | 4.58 | Gasoline |
| Advertencias | IM | Gasoline |

Los resultados del bioetanol obtenido a partir de caña de azúcar muestran una menor densidad en comparación con las otras biomásas, así como valores de RON y MON superiores, lo que indica un mejor comportamiento frente a la detonación. En conjunto, estos parámetros evidencian que la caña de azúcar fue la biomasa que presentó los mejores resultados entre las tres evaluadas, ya que su bioetanol exhibe características más cercanas a las de un combustible automotriz convencional, aspecto que será analizado en conjunto con las demás biomásas en el apartado comparativo.

3.6 Comparación general de los resultados experimentales

Con el fin de evaluar el potencial del bioetanol obtenido a partir de las distintas biomásas como combustible automotriz, se realizó una comparación general de los parámetros más relevantes medidos mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel. Para este análisis se consideraron únicamente aquellas propiedades que influyen directamente en el comportamiento del combustible en motores de combustión interna.

3.6.1 Comparación de parámetros clave

En la Tabla 17 se muestran los principales parámetros comparativos del bioetanol obtenido a partir de papa, yuca y caña de azúcar.

Tabla 17

Comparación de parámetros clave del bioetanol obtenido

| Parámetro | Papa | Yuca | Caña de azúcar |
|-------------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| Densidad (S-Dens) | 0.9833 | 0.8375 | 0.842 |
| Contenido de etanol (%) | 11.0 | 32.2 | 45.8 |
| RON | 79.6 | 77.0 | 80.8 |
| MON | 79.0 | 78.1 | 80.0 |
| Contenido de agua (%) | 22.1 | 12.0 | 6.0 |

3.6.2 Análisis comparativo entre biomásas

A partir del análisis de los resultados, se concluyó que el bioetanol producido a partir de caña de azúcar presenta los valores más elevados de RON y MON, evidenciando una mayor resistencia a la detonación y un comportamiento similar al de combustibles convencionales. Su menor densidad favorece su uso en sistemas de combustión interna.

El bioetanol obtenido a partir de papa presenta una mayor densidad y una presencia significativa de agua y metanol, factores que pueden afectar negativamente el proceso de combustión y la estabilidad del motor. Por su parte, el bioetanol de yuca muestra valores intermedios en la mayoría de los parámetros analizados, evidenciando un comportamiento moderado en comparación con las otras biomásas.

3.6.3 Observaciones relevantes

- La biomasa influye directamente en la composición y calidad del bioetanol obtenido.
- Los valores de RON y MON permiten una comparación directa con combustibles comerciales.
- La presencia de agua y metanol representa una limitación para el uso directo del bioetanol como combustible.
- Los resultados obtenidos permiten seleccionar la biomasa más adecuada para continuar con las pruebas de encendido en motor.

3.7 Análisis espectroscópico infrarrojo (FTIR) del bioetanol obtenido

Este apartado presenta el análisis espectroscópico infrarrojo (FTIR) de las muestras de bioetanol obtenidas a partir de papa, yuca y caña de azúcar, con el objetivo de identificar características asociadas a su composición química. El análisis FTIR permite observar la presencia de enlaces funcionales característicos del etanol y de otros compuestos presentes en el combustible, a partir de sus bandas de absorción en el espectro infrarrojo.

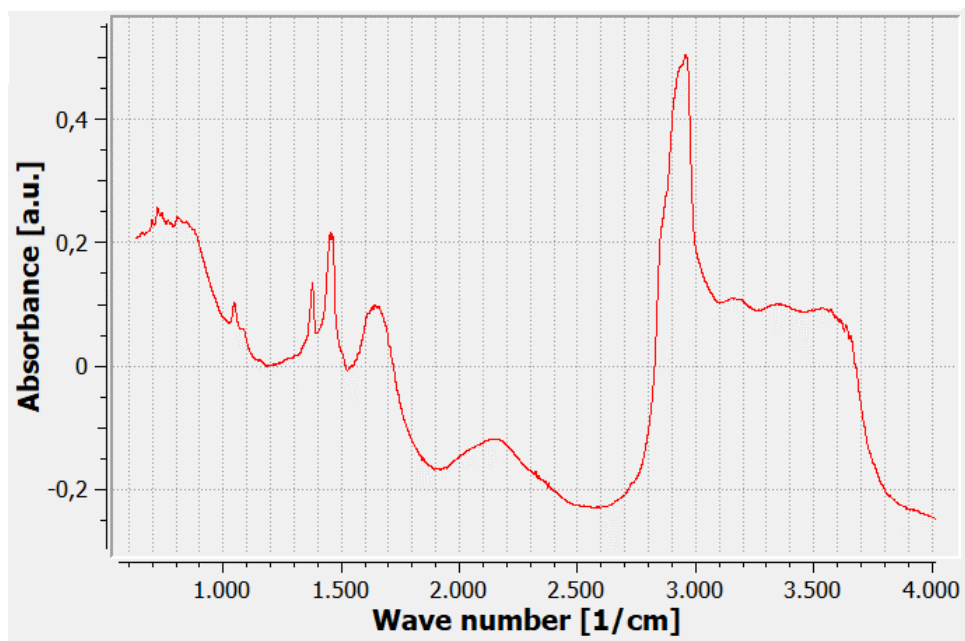
Las gráficas obtenidas mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel se utilizan como herramienta de apoyo para complementar la caracterización fisicoquímica del bioetanol y comparar el comportamiento espectral entre las diferentes biomásas estudiadas.

3.7.1 Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de papa

En este apartado se presenta el espectro FTIR correspondiente al bioetanol obtenido a partir de papa, el cual fue registrado mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel. El espectro obtenido permite visualizar el comportamiento espectral de la muestra y servirá como base para el análisis cualitativo de su composición, el cual se desarrolla a partir de la interpretación de las bandas observadas en la gráfica correspondiente.

Figura 98

Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de papa



Fuente: (Autores)

El espectro FTIR muestra una banda ancha e intensa en la zona aproximada de $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, asociada al estiramiento del grupo --OH , característica de alcoholes y fuertemente influenciada por la presencia de agua debido a enlaces por puente de hidrógeno. Esto sugiere que el destilado no es anhidro y mantiene humedad residual.

En la región cercana a $2900\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ se observa absorción atribuible a estiramientos C--H de grupos alifáticos (CH_3/CH_2), coherentes con la estructura del etanol. Adicionalmente, se identifican bandas en el rango $1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ relacionadas con vibraciones C--O , típicas de alcoholes, lo que respalda la presencia del etanol como componente principal.

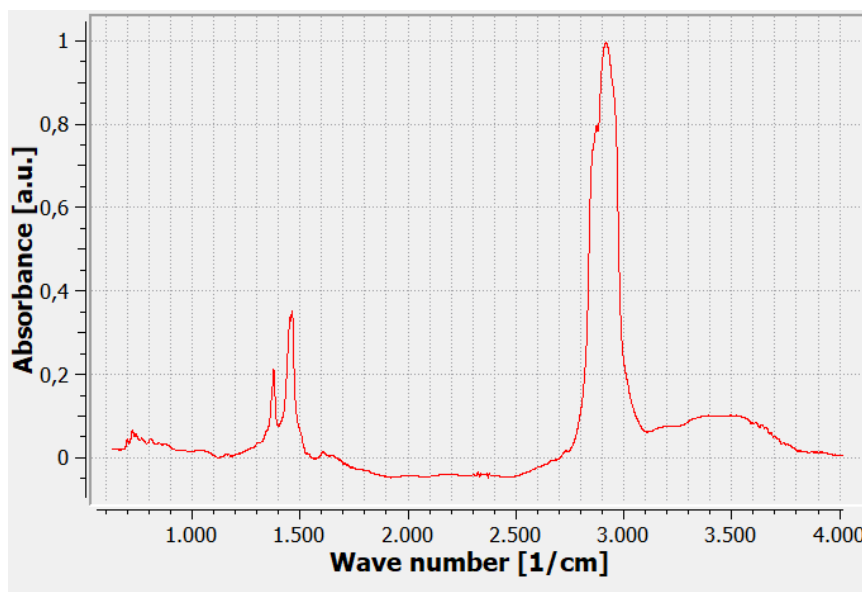
En conjunto, el patrón espectral es compatible con un destilado alcohólico con presencia apreciable de agua, sin evidenciar señales dominantes asociadas a hidrocarburos pesados o aromáticos.

3.7.2 Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de yuca

En este apartado se presenta el espectro FTIR correspondiente al bioetanol obtenido a partir de yuca, el cual permite analizar de manera comparativa su comportamiento espectral respecto a las otras biomásas estudiadas.

Figura 99

Espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de yuca



Fuente: (Autores)

El espectro FTIR del bioetanol obtenido a partir de yuca muestra una banda ancha e intensa en la región aproximada de $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, atribuida al estiramiento del grupo --OH , característica de alcoholes y asociada a la presencia de enlaces por puente de hidrógeno. Esto indica que el destilado contiene una fracción de agua residual y no corresponde a un etanol completamente anhidro.

En la región comprendida entre $2900\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ se observa absorción asociada a estiramientos C--H de grupos alifáticos (CH_3/CH_2), compatibles con la estructura molecular del etanol. Asimismo, se identifican bandas en el rango de $1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ correspondientes a vibraciones del enlace C--O , típicas de alcoholes, lo que confirma la presencia del etanol como componente principal del bioetanol obtenido.

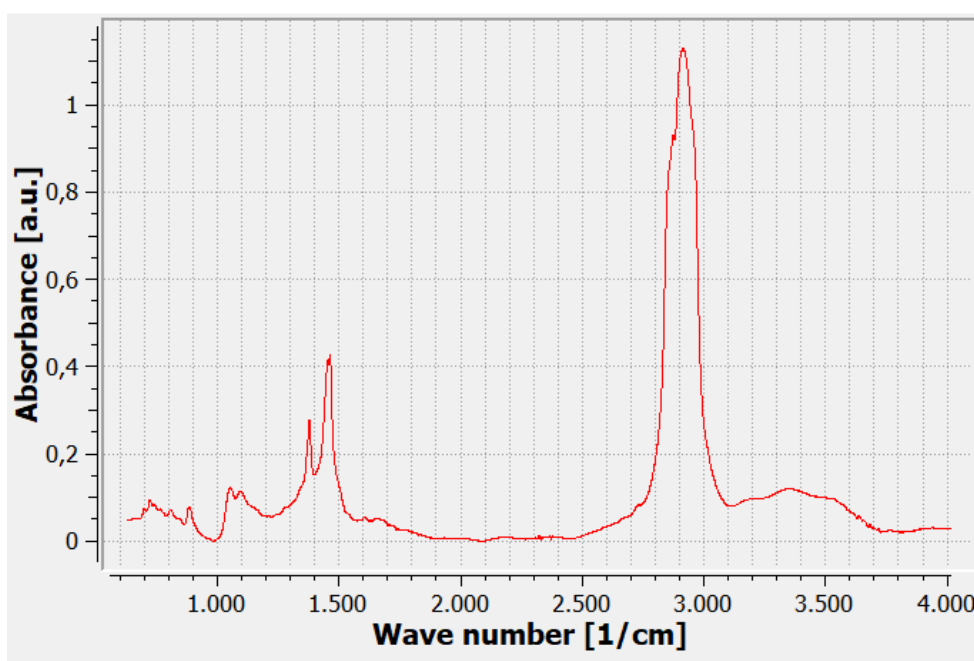
En conjunto, el patrón espectral es coherente con un destilado alcohólico con presencia apreciable de agua, sin evidenciar señales dominantes asociadas a hidrocarburos pesados o compuestos aromáticos.

3.7.3 Espectro FTIR del bioetanol producido a partir de caña de azúcar

En este apartado se presenta el espectro FTIR correspondiente al bioetanol producido a partir de caña de azúcar, el cual permite analizar su comportamiento espectral y compararlo con los resultados obtenidos para las demás biomásas analizadas.

Figura 100

Espectro FTIR del bioetanol producido a partir de caña de azúcar



Fuente: (Autores)

El espectro FTIR del bioetanol producido a partir de caña de azúcar presenta una banda ancha e intensa en la región aproximada de 3200–3600 cm^{-1} , asociada al estiramiento del grupo –OH, característica de alcoholes. La forma y amplitud de esta banda indican la presencia de enlaces por puente de hidrógeno, lo que sugiere la existencia de una fracción de agua residual en la muestra analizada.

En la región cercana a 2900–3000 cm^{-1} se observa una absorción pronunciada atribuible a estiramientos C–H de grupos alifáticos (CH₃/CH₂), coherentes con la estructura molecular del etanol. Asimismo, se identifican bandas en el rango de 1000–1200 cm^{-1} relacionadas con vibraciones del enlace C–O, típicas de alcoholes, confirmando la presencia del etanol como componente principal del bioetanol producido a partir de caña de azúcar.

En conjunto, el patrón espectral es consistente con un destilado alcohólico con presencia de agua residual, sin evidenciar señales dominantes asociadas a hidrocarburos pesados o compuestos aromáticos, lo que resulta favorable para su uso como combustible en mezclas con gasolina.

3.8 Prueba experimental en un motor MEP utilizando el bioetanol obtenido puro

En este apartado se describe el sistema empleado para realizar las pruebas experimentales de encendido del bioetanol obtenido. Las evaluaciones se llevaron a cabo utilizando un motor dispuesto como maqueta funcional perteneciente a la universidad, el cual permitió analizar de manera básica el comportamiento del combustible en condiciones controladas.

3.8.1 Descripción del motor

Las pruebas experimentales de encendido se realizaron utilizando un motor a gasolina montado en una maqueta didáctica, correspondiente a un motor de un HYUNDAI NEW EF SONATA 2.0 año 2012 perteneciente a la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana. Este sistema forma parte de un equipo de entrenamiento académico diseñado para el estudio y la evaluación básica del funcionamiento de motores de combustión interna bajo condiciones controladas.

El motor se encuentra instalado sobre un banco de pruebas educativo, el cual integra instrumentación básica para el monitoreo de las variables de operación, tales como indicadores de vacío, presión de combustible y parámetros eléctricos; además, el sistema dispone de controles de encendido y aceleración que permiten realizar pruebas de arranque y funcionamiento en régimen de ralentí, sin la aplicación de carga externa, proporcionando un entorno controlado y seguro para fines académicos y experimentales.

Figura 101

Maqueta didáctica del motor funcional utilizada en las pruebas experimentales.



Fuente: (Autores)

A continuación, se presenta una tabla con las características técnicas más relevantes del motor utilizado en el estudio.

Tabla 18

Características técnicas del motor Hyundai NEW EF Sonata 2.0

| Parámetro | Especificación |
|--------------------------|---|
| Marca | Hyundai |
| Modelo de vehículo | Sonata (Generación EF) |
| Denominación | NEW EF SONATA 2.0 |
| Tipo de motor | Gasolina |
| Configuración | 4 cilindros en línea |
| Cilindrada | 2.0 L ($\approx 1997 \text{ cm}^3$) |
| Sistema de válvulas | DOHC, 16 válvulas |
| Sistema de alimentación | Inyección electrónica multipunto (MPFI) |
| Aspiración | Natural |
| Sistema de refrigeración | Refrigeración por líquido |

| | |
|----------------------------|----------------------------------|
| Potencia máxima | 136 – 145 HP |
| Par motor máximo | 180 – 190 Nm |
| Régimen de potencia máxima | ~6.000 – 6.500 rpm |
| Relación de compresión | 10:1 |
| Tipo de distribución | Correa dentada |
| Aplicación | Vehículo de pasajeros tipo sedán |

Fuente: (Hyundai Motor Company, 2005)

3.8.2 Criterios de evaluación

Para la evaluación experimental del bioetanol en el motor se establecieron criterios de carácter funcional y observacional, orientados a analizar su comportamiento básico como combustible alternativo bajo condiciones controladas. Estos criterios permitieron verificar la viabilidad del bioetanol obtenido a partir de las diferentes biomásas para aplicaciones automotrices preliminares.

Los criterios considerados fueron los siguientes:

- **Encendido:** Capacidad del motor para iniciar su funcionamiento al utilizar el combustible evaluado, observando si el arranque se realiza de manera efectiva.
- **Estabilidad en régimen de ralentí:** Comportamiento del motor una vez encendido, evaluando si mantiene un funcionamiento continuo y estable sin apagarse ni presentar fallas evidentes.
- **Tiempo de funcionamiento:** Duración durante la cual el motor permanece encendido en régimen de ralentí utilizando el combustible evaluado.

3.8.3 Resultados de primer encendido y observaciones experimentales

Con la finalidad de analizar el comportamiento del bioetanol en condiciones reales de operación, se realizó una prueba de primer encendido del motor MEP utilizando exclusivamente bioetanol puro (100 %) producido a partir de caña de azúcar, seleccionado previamente como la biomasa con mejores propiedades fisicoquímicas. Para esta prueba, el tanque de combustible fue completamente vaciado, eliminando cualquier residuo de gasolina convencional, tras lo cual se cargaron aproximadamente 2 litros del bioetanol mencionado.

Figura 102

Vaciado completo del tanque de combustible previo al uso de bioetanol puro



Fuente: (Autores)

Durante los ensayos se efectuaron varios intentos de arranque bajo las mismas condiciones operativas; sin embargo, el motor no logró encender, observándose únicamente intentos parciales de combustión sin alcanzar un régimen de funcionamiento estable. Este comportamiento se atribuye principalmente a las limitaciones propias del bioetanol puro en motores diseñados para gasolina, tales como su menor poder calorífico, su diferente comportamiento de vaporización y la presencia de humedad residual, factores que influyen especialmente el proceso de arranque.

Dado que el bioetanol de caña de azúcar presentó los mejores valores de RON, MON y menor contenido de agua dentro de las biomásas analizadas, se concluye que el uso de bioetanol puro obtenido a partir de papa o yuca, cuyas propiedades son inferiores, tampoco permitiría el encendido del motor bajo las mismas condiciones. Este resultado justificó la necesidad de evaluar mezclas bioetanol–gasolina, con el fin de mejorar las propiedades del combustible y posibilitar el funcionamiento del motor, análisis que se desarrolla en las secciones posteriores.

3.9 Preparación de mezclas bioetanol–gasolina para pruebas en motor

Debido a que el bioetanol puro (100 %) no permitió el encendido del motor de encendido provocado, se procedió a la preparación de mezclas bioetanol–gasolina, práctica ampliamente documentada en la literatura técnica para motores diseñados originalmente para operar con gasolina. Diversos estudios experimentales señalan que la incorporación de etanol en proporciones adecuadas permite mejorar el número de octano del combustible y mantener condiciones favorables de vaporización y arranque, especialmente cuando se emplea etanol no anhidro producido a escala experimental.

La literatura reporta que las mezclas etanol–gasolina dentro de rangos comprendidos entre E20 y E85 han sido evaluadas con resultados favorables en motores de encendido provocado, indicando que la proporción óptima depende directamente de la calidad del bioetanol, particularmente de su contenido alcohólico y humedad residual. En este contexto, las mezclas empleadas en el presente estudio fueron ajustadas experimentalmente dentro de dichos rangos, considerando las propiedades fisicoquímicas del bioetanol producido a partir de cada biomasa, con el fin de garantizar el encendido del motor y evaluar la relación entre la fracción de gasolina y el comportamiento del combustible (Gajewski, Wyrąbkiewicz, & Kaszkowiak, 2025)

3.9.1 Preparación de la mezcla de bioetanol con gasolina a partir de caña de azúcar

El bioetanol obtenido mediante la caña de azúcar presentó los mejores valores de RON, MON y el menor contenido de agua entre las biomásas evaluadas, por lo que permitió trabajar con una mayor fracción de bioetanol en la mezcla. En base a estas características y siguiendo los rangos reportados en estudios experimentales sobre mezclas etanol–gasolina, se preparó una mezcla con 80 % de bioetanol y 20 % de gasolina (E80).

Para garantizar la repetibilidad del ensayo, la mezcla fue preparada con un volumen total de 2 litros (2000 ml), correspondiendo a 1600 ml de bioetanol de caña de azúcar y 400 ml de gasolina. Esta proporción permitió combinar el alto comportamiento antidetonante del etanol con la capacidad de arranque aportada por la gasolina, posibilitando el encendido y funcionamiento estable del motor durante las pruebas experimentales.

3.9.2 Preparación de la mezcla de bioetanol con gasolina a partir de papa

El bioetanol obtenido a partir de papa presentó un mayor contenido de humedad residual y una menor concentración alcohólica en comparación con el bioetanol de caña de azúcar, lo que hizo necesario incrementar la fracción de gasolina para garantizar condiciones adecuadas de encendido. En función de estos resultados, se preparó una mezcla compuesta por 65 % de bioetanol y 35 % de gasolina (E65).

La mezcla se elaboró con un volumen total de 2 litros (2000 ml), utilizando 1300 ml de bioetanol de papa y 700 ml de gasolina. El incremento de la fracción de gasolina permitió mejorar el proceso de vaporización del combustible y compensar las limitaciones asociadas a la calidad del bioetanol obtenido, asegurando el encendido del motor bajo las condiciones de ensayo.

3.9.3 Preparación de la mezcla de bioetanol con gasolina a partir de yuca

El bioetanol obtenido a partir de yuca presentó propiedades intermedias entre las muestras de papa y caña de azúcar, tanto en contenido alcohólico como en humedad residual. En consecuencia, se adoptó una proporción intermedia de mezcla, consistente en 60 % de bioetanol y 40 % de gasolina (E60).

Para esta mezcla se empleó un volumen total de 2 litros (2000 mL), equivalente a 1200 mL de bioetanol de yuca y 800 mL de gasolina. Esta proporción permitió alcanzar un equilibrio entre el aporte de octanaje proporcionado por el bioetanol y la estabilidad de encendido asociada a la gasolina, facilitando la evaluación experimental del comportamiento del motor.

3.9.4 Tabla resumen de las mezclas bioetanol–gasolinas preparadas

A continuación, se muestra una tabla resumen que detalla la identificación, composición porcentual y volúmenes parciales de bioetanol y gasolina utilizados en la preparación de las mezclas empleadas para las pruebas experimentales en el motor, permitiendo una visualización clara y comparativa de las proporciones adoptadas para cada biomasa.

Tabla 19

Resumen de mezclas de bioetanol-gasolina empleadas en las pruebas experimentales de encendido en motor.

| Biomasa origen bioetanol | Identificación de la mezcla | Bioetanol (%) | Gasolina (%) | Bioetanol (ml) | Gasolina (ml) |
|---|--|--------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Caña de azúcar | E80 | 80 | 20 | 1600 | 400 |
| Papa | E65 | 65 | 35 | 1300 | 700 |
| Yuca | E60 | 60 | 40 | 1200 | 800 |

Fuente: (Autores)

3.10 Análisis de las mezclas bioetanol–gasolina mediante ERASPEC FTIR Fuel

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de las mezclas bioetanol–gasolina desde una perspectiva automotriz, dichas mezclas fueron analizadas mediante el equipo ERASPEC FTIR Fuel empleando el modo de medición para gasolina. El análisis se centró exclusivamente en los parámetros más relevantes para la evaluación del desempeño del combustible en motores de encendido incitado, específicamente la densidad, el número de octano de investigación (RON), el número de octano del motor (MON), el contenido de etanol y el contenido de agua, los cuales permiten establecer una relación directa entre las propiedades del combustible y el encendido del motor, así como realizar una comparación directa con los resultados obtenidos previamente para el bioetanol puro.

3.10.1 Resultados de la mezcla E80 (bioetanol con gasolina a partir de caña de azúcar)

La mezcla E80, producida a partir de bioetanol de caña de azúcar, fue analizada con fines comparativos, considerando únicamente las propiedades fisicoquímicas más relevantes para la evaluación automotriz, las cuales incluyen el número de octano de investigación (RON), el número de octano del motor (MON), el contenido de etanol, el contenido de agua y la densidad. Estos parámetros permiten establecer una comparación directa con el bioetanol puro y con las demás mezclas evaluadas, enfocándose en los

aspectos que influyen de manera más significativa en el comportamiento del combustible en motores de encendido provocado.

Tabla 20

Propiedades fisicoquímicas de la mezcla E80 (bioetanol–gasolina a partir de caña de azúcar)

| Parámetro | Valor |
|---|--------------|
| Densidad (S-Dens) | 0.792 |
| Contenido de etanol (%) | 80.0 |
| Número de octano de investigación (RON) | 90.1 |
| Número de octano del motor (MON) | 87.6 |
| Contenido de agua (%) | 3.2 |

3.10.2 Resultados de la mezcla E65 (bioetanol con gasolina a partir de papa)

La mezcla E65, obtenida a partir de bioetanol de papa, fue evaluada con fines comparativos, considerando únicamente las propiedades fisicoquímicas más relevantes para la evaluación automotriz, con el objetivo de disponer de una base homogénea de resultados que permita su análisis posterior en conjunto con las demás mezclas estudiadas.

Tabla 21

Propiedades fisicoquímicas de la mezcla E65 (bioetanol–gasolina a partir de papa)

| Parámetro | Valor |
|---|--------------|
| Densidad (S-Dens) | 0.785 |
| Contenido de etanol (%) | 65.0 |
| Número de octano de investigación (RON) | 88.2 |
| Número de octano del motor (MON) | 85.6 |
| Contenido de agua (%) | 4.5 |

3.10.3 Resultados de la mezcla E60 (bioetanol con gasolina a partir de yuca)

La mezcla E60, obtenida a partir de bioetanol de yuca, fue evaluada con fines comparativos, considerando las mismas propiedades fisicoquímicas empleadas en los análisis de las mezclas anteriores, con el objetivo de disponer de resultados homogéneos que permitan su comparación posterior con el bioetanol puro y con las demás mezclas bioetanol–gasolina comercial.

Tabla 22

Propiedades fisicoquímicas de la mezcla E60 (bioetanol–gasolina a partir de yuca)

| Parámetro | Valor |
|---|--------------|
| Densidad (S-Dens) | 0.780 |
| Contenido de etanol (%) | 60.0 |
| Número de octano de investigación (RON) | 87.4 |
| Número de octano del motor (MON) | 84.9 |
| Contenido de agua (%) | 4.0 |

3.10.4 Análisis comparativo entre bioetanol puro y mezclas (gráficas).

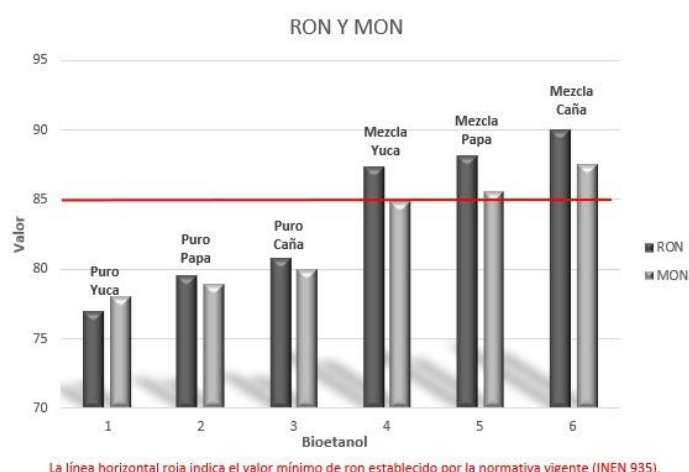
Con el fin de evaluar el efecto de la incorporación de gasolina convencional sobre el comportamiento del bioetanol obtenido, se realizó un análisis comparativo entre las muestras de bioetanol puro y las mezclas bioetanol con gasolina elaboradas. Para este análisis se consideraron únicamente las variables fisicoquímicas más relevantes para la aplicación automotriz, específicamente el número de octano de investigación (RON), el número de octano del motor (MON), el contenido de etanol, el contenido de agua y la densidad, las cuales permiten interpretar de manera directa las variaciones introducidas por la mezcla y su influencia potencial en el encendido y funcionamiento del motor.

3.10.5 Comparación del número de octano (RON y MON) del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina

La Figura 103 muestra la comparación de los valores de número de octano de investigación (RON) y número de octano del motor (MON) correspondientes al bioetanol puro y a las mezclas bioetanol con gasolina elaboradas a partir de las biomásas estudiadas, considerando estas variables por su importancia directa en el comportamiento antidetonante del combustible y su influencia en el funcionamiento de motores de encendido provocado.

Figura 103

Comparación de los valores de RON y MON del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina



Fuente: (Autores)

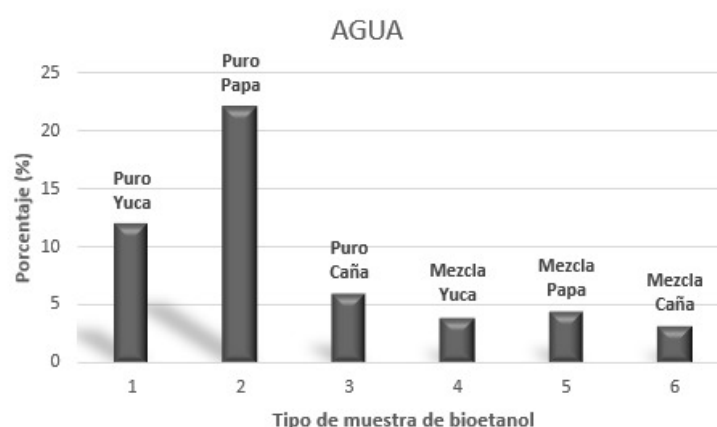
A partir del análisis de la gráfica se observa que los bioetanoles puros no alcanzan el valor mínimo de RON establecido por la normativa INEN 935, lo cual justifica las limitaciones presentadas durante las pruebas de encendido con combustible puro. En contraste, las mezclas bioetanol con gasolina evidencian un incremento significativo de los valores de RON y MON, superando en todos los casos el umbral normativo. Asimismo, se identifica una tendencia clara en la que la mezcla E80 obtenida a partir de caña de azúcar presenta los mayores valores, seguida por la mezcla E65 de papa y la mezcla E60 de yuca, confirmando que la incorporación de gasolina convencional mejora el comportamiento antidetonante del bioetanol y respalda el uso de mezclas como alternativa técnica viable para aplicación automotriz.

3.10.6 Comparación del contenido de agua del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina

La Figura 104 muestra la comparación del contenido de agua correspondiente al bioetanol puro obtenido a partir de papa, yuca y caña de azúcar, así como a las mezclas bioetanol con gasolina elaboradas, considerando esta variable por su influencia directa en la estabilidad del combustible y en el proceso de encendido del motor.

Figura 104

Comparación de los valores de RON y MON del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina



Fuente: (Autores)

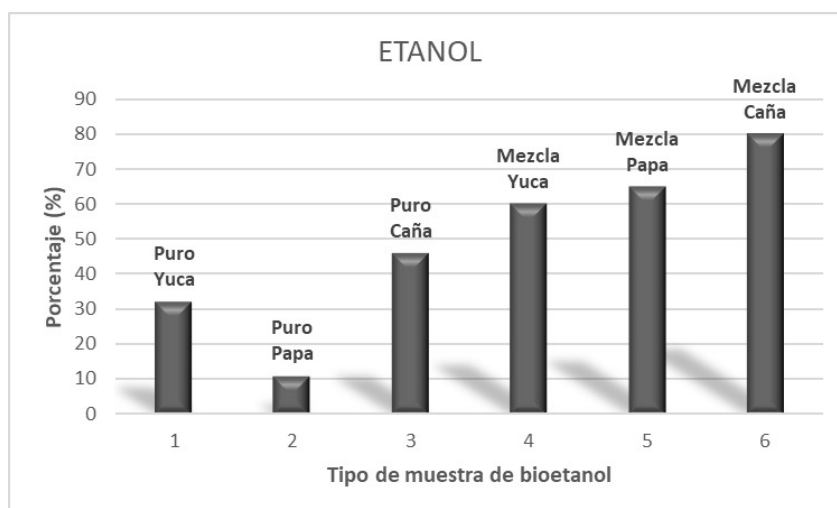
A partir de la gráfica se observa que los bioetanoles puros presentan un contenido de agua considerablemente mayor, especialmente en el caso de la papa, lo cual limita su uso directo en motores de combustión interna. En contraste, las mezclas bioetanol–gasolina muestran una reducción significativa del contenido de agua, manteniéndose en valores bajos y similares entre sí, siendo la mezcla obtenida a partir de caña de azúcar la que presenta el menor contenido de agua. Estos resultados evidencian que la incorporación de gasolina convencional contribuye a mejorar la calidad del combustible, reduciendo uno de los principales factores que afectan negativamente el encendido y funcionamiento del motor.

3.10.7 Comparación del contenido de etanol del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina

La Figura 105 muestra la comparación del contenido de etanol correspondiente al bioetanol puro y a las mezclas bioetanol con gasolina obtenidas a partir de las biomásas estudiadas, considerando esta variable por su relación directa con el poder antidetonante del combustible y su influencia en la composición final de las mezclas.

Figura 105

Comparación del contenido de etanol del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina



Fuente: (Autores)

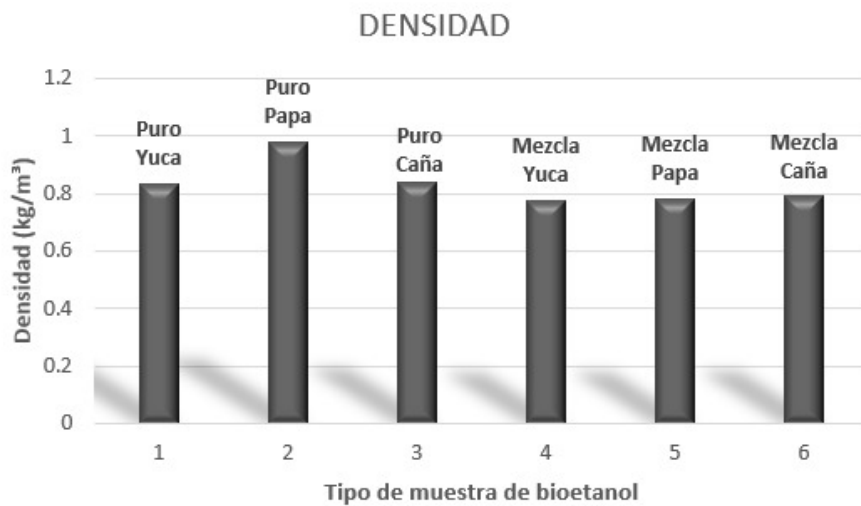
Del análisis de la gráfica se observa que el contenido de etanol aumenta de manera significativa al pasar del bioetanol puro a las mezclas, alcanzando los valores más elevados en la mezcla E80 obtenida a partir de caña de azúcar, seguida por la mezcla E65 de papa y la mezcla E60 de yuca. Este comportamiento confirma que la formulación de mezclas permitió incrementar de forma controlada la fracción de etanol, manteniendo una jerarquía coherente entre biomásas y contribuyendo a la mejora de las propiedades del combustible para su aplicación automotriz.

3.10.8 Comparación de la densidad del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina

La Figura 106 muestra la comparación de la densidad del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol con gasolina elaboradas a partir de las biomásas estudiadas, considerando esta propiedad por su relación directa con la composición del combustible y su influencia en el proceso de combustión.

Figura 106

Comparación de la densidad del bioetanol puro y de las mezclas bioetanol–gasolina



A partir de la gráfica se observa que los bioetanoles puros presentan densidades más elevadas, especialmente en el caso de la papa, asociadas a un mayor contenido de agua. En contraste, las mezclas bioetanol–gasolina muestran una reducción de la densidad, manteniéndose en valores más cercanos a los de la gasolina convencional, siendo la mezcla obtenida a partir de caña de azúcar la que presenta la menor densidad. Este comportamiento es coherente con la incorporación de gasolina y con la mejora general de las propiedades del combustible para su aplicación automotriz.

3.11 Prueba experimental en un motor MEP utilizando mezclas bioetanol con gasolina

En este apartado se describe el procedimiento experimental seguido para evaluar el comportamiento de las mezclas bioetanol con gasolinas preparadas a partir de las biomásas de caña de azúcar, papa y yuca, durante pruebas de encendido y funcionamiento básico del motor de combustión interna. El objetivo de estas pruebas fue verificar de manera preliminar la viabilidad funcional del bioetanol obtenido, bajo condiciones controladas y sin aplicación de carga.

3.11.1 Condiciones iniciales del motor

El motor fue sometido a las pruebas experimentales en condición de arranque en frío, es decir, sin haber sido operado previamente, con el fin de evaluar la capacidad de encendido de cada mezcla bajo condiciones más exigentes. Durante todas las pruebas, el motor operó únicamente en régimen de ralentí, sin la aplicación de carga externa.

La maqueta didáctica del motor dispone de un tacómetro incorporado, el cual permitió verificar de manera visual la estabilidad del régimen de giro durante el funcionamiento. No se emplearon instrumentos adicionales de medición, limitándose la evaluación a criterios funcionales y observacionales.

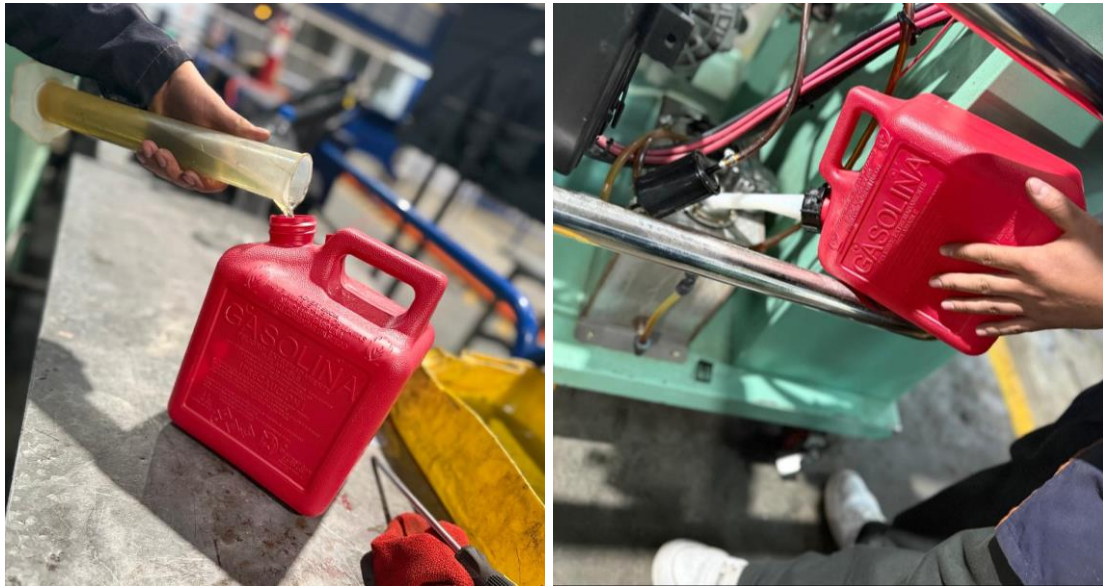
Las pruebas se realizaron en el taller de la Universidad Politécnica Salesiana, un espacio adecuado para este tipo de ensayos, que permitió el control visual del motor y el desarrollo seguro de las actividades experimentales.

3.11.2 Carga del combustible

Una vez verificado que el sistema de combustible se encontraba en condiciones adecuadas y con el tanque previamente vaciado, se procedió a la carga de la mezcla bioetanol con gasolina correspondiente a cada ensayo. Posteriormente, se comprobó la correcta alimentación del combustible hacia el sistema de inyección, asegurando que la mezcla llegara de manera adecuada antes de iniciar el proceso de encendido del motor.

Figura 107

Medición volumétrica, preparación y carga de mezclas bioetanol–gasolina en el motor



Fuente: (Autores)

3.11.3 Secuencia de pruebas experimentales

Las pruebas de funcionamiento del motor se realizaron siguiendo un orden definido, comenzando con la mezcla correspondiente al bioetanol obtenido a partir de caña de azúcar, seguida de la mezcla elaborada con bioetanol de papa y, finalmente, la mezcla de bioetanol de yuca.

Para cada mezcla, se procedió al arranque del motor en frío, observando el comportamiento durante el encendido. En el caso del bioetanol de caña de azúcar, el motor presentó una mayor facilidad de encendido, aunque fue necesario realizar varios intentos de arranque hasta lograr el funcionamiento estable. Por el contrario, las mezclas correspondientes a los bioetanoles de papa y yuca requirieron un mayor número de intentos y un mayor tiempo para lograr el encendido inicial.

Una vez encendido, el motor se mantuvo en funcionamiento durante aproximadamente 10 minutos en régimen de ralentí para cada mezcla, evaluando su estabilidad operativa. Al finalizar cada prueba, el motor fue apagado y se dejó un tiempo de espera de aproximadamente 5 minutos antes de iniciar la siguiente prueba, permitiendo la disipación térmica y la preparación del sistema para la siguiente mezcla.

Figura 108

Motor en funcionamiento en régimen de ralentí durante la prueba experimental.



Fuente: (Autores)

3.12 Resultados experimentales de funcionamiento del motor

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales se consideraron criterios de evaluación de carácter funcional, enfocados en el comportamiento básico del motor. Entre los aspectos observados se incluyeron la facilidad de encendido, el tiempo requerido para lograr el arranque, y la estabilidad del motor en régimen de ralentí.

En las tres mezclas evaluadas se observó que, una vez logrado el encendido, el motor presentó un funcionamiento estable en ralentí, sin apagados espontáneos durante el tiempo de prueba establecido. Estas observaciones sirvieron como base para el análisis comparativo posterior del desempeño del bioetanol obtenido a partir de las distintas biomásas.

3.13 Análisis comparativo del desempeño en el motor

En este apartado se presenta el análisis comparativo del desempeño del motor al operar con las mezclas bioetanol con gasolina obtenidas a partir de caña de azúcar, papa y yuca. El análisis se basa en los resultados observados durante las pruebas experimentales de encendido y funcionamiento en régimen de ralentí, considerando criterios funcionales y relacionándolos con las propiedades fisicoquímicas del bioetanol previamente caracterizado en laboratorio.

3.14 Desempeño del motor con mezcla de bioetanol de caña de azúcar con gasolina

3.14.1 Comportamiento de arranque del motor durante el encendido

Durante las pruebas experimentales realizadas con la mezcla bioetanol–gasolina correspondiente al bioetanol producido a partir de caña de azúcar, el motor presentó un comportamiento de arranque favorable en comparación con las demás biomásas evaluadas. El encendido se logró tras dos a tres intentos, evidenciándose únicamente ligeras dificultades durante la fase inicial de arranque.

No fue necesario aplicar aceleración manual para mantener el motor en funcionamiento inmediatamente después del encendido, lo que indica una adecuada capacidad de ignición del combustible. Este comportamiento sugiere que la mezcla utilizada permitió un arranque controlado y relativamente estable, acorde con las propiedades fisicoquímicas favorables del bioetanol de caña previamente determinadas en laboratorio.

3.14.2 Estabilidad en régimen de ralentí

Una vez alcanzado el encendido, el motor se mantuvo estable en régimen de ralentí durante todo el tiempo de prueba establecido. No se registraron apagados espontáneos, lo que evidencia un funcionamiento continuo bajo condiciones sin carga.

Durante esta etapa se observaron únicamente leves fluctuaciones del régimen de giro, las cuales no comprometieron la estabilidad general del motor. Este comportamiento indica una combustión suficientemente uniforme y controlada, adecuada para una evaluación funcional preliminar del combustible.

3.14.3 Análisis comparativo del desempeño en el motor

El funcionamiento del motor en régimen de ralentí presentó una regularidad adecuada, caracterizada por un sonido uniforme y una respuesta suave. Se percibieron vibraciones leves, propias del funcionamiento normal del motor en banco didáctico, sin manifestaciones anómalas ni comportamientos irregulares.

De manera general, el motor funcionó de manera continua durante todo el periodo de prueba, sin necesidad de correcciones manuales. El comportamiento observado fue

limpio y estable, sin presentar características fuera de lo normal. En comparación con las otras biomásas evaluadas, el bioetanol de caña de azúcar fue el que mostró la mejor respuesta global del motor, consolidándose como la alternativa con desempeño más favorable dentro del alcance experimental del presente estudio.

3.15 Desempeño del motor con mezcla de bioetanol de papa con gasolina

3.15.1 Comportamiento de arranque del motor durante el encendido

Durante las pruebas experimentales realizadas con la mezcla bioetanol–gasolina correspondiente al bioetanol obtenido a partir de papa, el motor presentó mayores dificultades durante el proceso de arranque en comparación con la mezcla elaborada a partir de caña de azúcar. El encendido se logró tras cuatro a cinco intentos, evidenciándose dificultades notorias durante la fase inicial del encendido.

En este caso fue necesario aplicar aceleración manual para evitar que el motor se apague inmediatamente después del arranque, lo que indica una menor capacidad de ignición del combustible. Este comportamiento refleja una respuesta inicial menos favorable del motor, asociada a las características fisicoquímicas del bioetanol de papa previamente determinadas en el análisis de laboratorio.

3.15.2 Estabilidad en régimen de ralentí

Una vez alcanzado el encendido, el motor se mantuvo en funcionamiento en régimen de ralentí; sin embargo, la estabilidad observada fue inferior a la registrada con la mezcla de caña de azúcar. El comportamiento en ralentí puede calificarse como medianamente estable, presentando fluctuaciones leves del régimen de giro.

Durante el tiempo de prueba se observó, en algunos momentos, una tendencia del motor a apagarse, lo que hizo necesaria la realización de correcciones ocasionales para mantener el funcionamiento continuo.

3.15.3 Regularidad del régimen de giro y observaciones generales

El funcionamiento del motor en régimen de ralentí presentó una regularidad limitada, caracterizada por un sonido ligeramente irregular y la presencia de vibraciones leves.

De manera general, el motor mostró una respuesta más pesada y un funcionamiento menos limpio, con ligeros jalones durante el ralentí, lo que refleja una menor estabilidad global del sistema. En comparación con el bioetanol de caña de azúcar, la mezcla elaborada a partir de papa presentó un desempeño inferior, especialmente en términos de estabilidad en régimen de ralentí, aunque permitió mantener el motor en funcionamiento bajo condiciones controladas.

3.16 Desempeño del motor con mezcla de bioetanol de yuca con gasolina

3.16.1 Comportamiento de arranque del motor durante el encendido

Durante las pruebas experimentales realizadas con la mezcla bioetanol–gasolina correspondiente al bioetanol obtenido a partir de yuca, el motor presentó dificultades notorias durante el proceso de arranque. El encendido se logró tras más de cinco intentos, evidenciando una menor facilidad de ignición en comparación con las mezclas elaboradas a partir de caña de azúcar y papa.

En este caso fue necesario aplicar aceleración manual para evitar que el motor se apague inmediatamente después del arranque, lo que indica una respuesta inicial desfavorable del motor. Este comportamiento refleja una capacidad limitada de ignición del combustible, asociada a las características fisicoquímicas del bioetanol de yuca previamente determinadas en el análisis de laboratorio.

3.16.2 Estabilidad en régimen de ralentí

Una vez alcanzado el encendido, el motor logró mantenerse en funcionamiento en régimen de ralentí; sin embargo, la estabilidad observada fue baja. Durante la prueba se presentaron fluctuaciones moderadas del régimen de giro y una tendencia ocasional a apagarse, lo que afectó la continuidad del funcionamiento.

Asimismo, se registraron aproximadamente tres apagados espontáneos durante el tiempo total de prueba, lo que evidencia una combustión inestable y una menor confiabilidad operativa del motor al utilizar esta mezcla. Estas condiciones reflejan un comportamiento inferior en comparación con las mezclas correspondientes a las otras biomásas evaluadas.

3.16.3 Regularidad del régimen de giro y observaciones generales

El funcionamiento del motor en régimen de ralentí presentó una regularidad limitada, caracterizada por un sonido ligeramente irregular y la presencia de vibraciones moderadas. Estas manifestaciones indican una combustión menos uniforme y una respuesta mecánica menos estable del motor.

De manera general, el comportamiento del motor con bioetanol de yuca puede calificarse como intermedio en términos funcionales; no obstante, presentó una estabilidad inferior a la observada con los bioetanoles de caña de azúcar y papa. La menor estabilidad global y la tendencia por apagarse confirman que esta biomasa mostró el desempeño más limitado dentro del alcance experimental del presente estudio.

3.17 Comparación global del desempeño del motor

Con el fin de integrar los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales, se realiza una comparación global del desempeño del motor al operar con las mezclas bioetanol–gasolinas correspondientes a las biomásas de caña de azúcar, papa y yuca. La comparación se fundamenta en parámetros funcionales y observacionales, tales como el comportamiento de arranque del motor durante el encendido, la estabilidad en régimen de ralentí, la regularidad del régimen de giro, la continuidad del funcionamiento y la presencia de vibraciones.

Tabla 23

Comparación global del desempeño del motor según la biomasa utilizada.

| Parámetro evaluado | Caña de azúcar | Papa | Yuca |
|----------------------------|--|---|--|
| Comportamiento de arranque | Favorable (2–3 intentos, sin aceleración manual) | Desfavorable (4–5 intentos, con aceleración manual) | Muy desfavorable (>5 intentos, con aceleración manual) |
| Estabilidad en ralentí | Estable | Medianamente estable | Poco estable |

| | | | |
|---------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Fluctuaciones del régimen | Leves | Leves | Moderadas |
| Apagados espontáneos | No se presentaron | No se presentaron | Aproximadamente 3 |
| Regularidad del régimen de giro | Uniforme | Ligeramente irregular | Ligeramente irregular |
| Vibraciones perceptibles | Leves | Leves | Moderadas |
| Continuidad del funcionamiento | Continua | Continua con correcciones ocasionales | Tendencia a apagarse |
| Desempeño global | Alto | Medio | Bajo |

Fuente: (Autores)

El análisis global del desempeño del motor evidencia diferencias claras en el comportamiento de las mezclas bioetanol–gasolina según la biomasa de origen. La mezcla elaborada con bioetanol de caña de azúcar presentó el mejor desempeño, caracterizándose por un arranque más favorable, mayor estabilidad en régimen de ralentí y un funcionamiento continuo y uniforme durante toda la prueba experimental.

El bioetanol obtenido a partir de papa mostró un desempeño intermedio. Aunque el motor presentó mayores dificultades durante el encendido inicial y una estabilidad inferior en comparación con la caña de azúcar, una vez logrado el arranque fue posible mantener el funcionamiento del motor bajo condiciones controladas, requiriendo correcciones ocasionales.

Por su parte, el bioetanol de yuca presentó el desempeño más limitado, con dificultades notorias durante el encendido, baja estabilidad en régimen de ralentí y presencia de apagados espontáneos, lo que refleja una menor confiabilidad operativa del motor. En conjunto, los resultados confirman que el desempeño del motor estuvo directamente influenciado por la calidad global del bioetanol, siendo la caña de azúcar la alternativa más favorable, seguida por la papa y, finalmente, la yuca.

3.18 Discusión de resultados

En este apartado se discuten los resultados obtenidos durante la caracterización fisicoquímica del bioetanol producido a partir de caña de azúcar, papa y yuca, así como su comportamiento durante las pruebas experimentales de funcionamiento en un motor de combustión interna. La discusión se desarrolla a partir de una evaluación experimental comparativa, relacionando los resultados de laboratorio con el desempeño observado en el motor, sin extender el análisis a parámetros como potencia, consumo o emisiones.

3.18.1 Discusión de los resultados fisicoquímicos del bioetanol

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización fisicoquímica evidencian diferencias entre los bioetanoles obtenidos a partir de las distintas biomásas estudiadas, lo cual confirma la influencia directa de la materia prima y del proceso de obtención en la calidad final del biocombustible. En términos generales, se observa que la pureza global del bioetanol resulta ser un factor más determinante que el contenido volumétrico de etanol por sí solo.

El bioetanol obtenido a partir de caña de azúcar presentó valores favorables en parámetros clave como densidad, contenido de agua y ausencia de metanol detectable, lo que indica una mayor calidad del combustible. Los resultados obtenidos coinciden con los reportes disponibles en la literatura técnica, donde se menciona que biocombustibles con menor presencia de agua e impurezas tienden a presentar un comportamiento más estable durante la combustión.

Por el contrario, los bioetanoles obtenidos a partir de papa y yuca mostraron una mayor presencia de agua y metanol, así como variaciones en la densidad, lo que refleja un menor grado de pureza. Estas condiciones son comúnmente asociadas a procesos de fermentación y destilación menos eficientes o a la naturaleza propia de la biomasa utilizada, y representan una limitación para el uso directo del bioetanol como combustible automotriz.

3.18.2 Relación entre la calidad del bioetanol y el comportamiento del motor

La relación entre las propiedades fisicoquímicas del bioetanol y el comportamiento observado durante las pruebas experimentales del motor resulta clara al

analizar los resultados de manera conjunta. El mejor desempeño en el encendido y la mayor estabilidad en régimen de ralentí se asociaron al bioetanol de caña de azúcar, el cual presentó una mayor pureza global y mejores características de combustión.

En el caso de los bioetanoles de papa y yuca, las mayores dificultades observadas durante el proceso de encendido y la ligera inestabilidad del ralentí pueden explicarse por la presencia de agua y metanol, compuestos que afectan negativamente la ignición y la estabilidad de la combustión. Por esta razón, fue necesario incrementar el porcentaje de gasolina en las mezclas correspondientes a estas biomásas, lo cual permitió compensar sus limitaciones y asegurar el funcionamiento del motor.

Estos resultados resaltan la idea de que el desempeño del bioetanol en el motor no depende exclusivamente del porcentaje de etanol presente, sino del equilibrio entre sus propiedades fisicoquímicas, especialmente la pureza global del combustible.

3.18.3 Implicaciones de los resultados para el uso de bioetanol

Desde una perspectiva experimental, los resultados obtenidos permiten establecer que el bioetanol obtenido a partir de caña de azúcar presenta las mejores condiciones para su aplicación en pruebas de funcionamiento en motores de combustión interna dentro del alcance del presente estudio, debido a su mayor pureza y a propiedades fisicoquímicas más favorables, las cuales contribuyen al encendido y a una mayor estabilidad operativa del motor, incluso con una mayor proporción de bioetanol en la mezcla.

Por su parte, los bioetanoles obtenidos a partir de papa y yuca muestran un potencial de uso condicionado a la optimización del proceso de obtención, particularmente en lo referente a la reducción del contenido de agua y subproductos, lo que permitiría subir el porcentaje de bioetanol en la mezcla y mejorar su comportamiento en el motor. En conjunto, los resultados confirman que la biomasa de origen y la calidad del bioetanol son factores determinantes en su desempeño experimental y constituyen criterios técnicos relevantes para futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló e implementó satisfactoriamente un procedimiento técnico de conversión de biomasa agrícola a bioetanol, aplicando procesos de fermentación alcohólica y destilación para papa, yuca y caña de azúcar, cumpliendo el objetivo general del proyecto. Mediante el procedimiento mencionado, a partir de 9 kg de papa se obtuvieron aproximadamente 2,0 L de bioetanol, de 8 kg de yuca se produjeron 1,5 L, y de 20 kg de caña de azúcar se alcanzaron 2,8 L, evidenciando diferencias significativas en rendimiento según la biomasa empleada.
- El análisis comparativo de los resultados permitió identificar que el bioetanol obtenido a partir de caña de azúcar presentó las mejores características fisicoquímicas para aplicación automotriz, reflejadas en mayores valores de RON y MON, densidad baja y menor contenido de agua en comparación con la papa y la yuca. Estas propiedades posicionan a la caña de azúcar como la biomasa con mayor capacidad técnica para la producción de bioetanol dentro de las condiciones experimentales evaluadas.
- Si bien el objetivo inicial del estudio contempló la evaluación del bioetanol obtenido en estado puro, las pruebas experimentales evidenciaron que, bajo las condiciones del presente trabajo y con bioetanol producido a escala de laboratorio, el encendido del motor no fue posible utilizando únicamente este combustible. No obstante, mediante la preparación de mezclas bioetanol–gasolina con una baja proporción de gasolina convencional, se logró el encendido y funcionamiento básico del motor, manteniendo una alta participación del bioetanol obtenido, lo que confirma su viabilidad técnica en forma de mezcla y abre la posibilidad de mejoras futuras orientadas al uso de bioetanol puro.

- Desde el punto de vista económico, el análisis preliminar evidenció diferencias en el costo de la materia prima utilizada para la obtención de bioetanol, siendo la caña de azúcar la alternativa más favorable con un costo aproximado de \$7, seguida por la papa con \$8 y la yuca con \$9, dentro de las cantidades y condiciones experimentales del estudio. Al considerar el costo global del procedimiento técnico a escala de laboratorio, estimado en aproximadamente \$300, este valor corresponde principalmente a instrumentación, insumos y equipamiento reutilizable, por lo que debe interpretarse como una inversión necesaria para el desarrollo, validación y optimización del proceso, y no como un gasto directo por unidad producida. En este contexto, el trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas al escalamiento del proceso, la mejora de la eficiencia energética, la optimización de costos y la evaluación de su impacto técnico y ambiental en escenarios de aplicación real.

RECOMENDACIONES

- Para lograr un bioetanol con mayor grado de pureza, se recomienda repetir el proceso de destilación en etapas sucesivas, considerando que cada redestilación incrementa la concentración alcohólica, aunque con una reducción progresiva del volumen final. Asimismo, se sugiere incrementar la cantidad inicial de materia prima con el fin de compensar las pérdidas volumétricas propias del proceso.
- Se recomienda utilizar levaduras de mayor tolerancia alcohólica y mayor eficiencia fermentativa, así como mantener un control adecuado de variables como temperatura, tiempo y condiciones anaeróbicas durante la fermentación, con el fin de maximizar el rendimiento alcohólico y disminuir la formación de subproductos no deseados que afecten la calidad del bioetanol.
- Para futuras investigaciones con enfoque automatizado, se recomienda incorporar métodos complementarios de deshidratación del bioetanol, tales como agentes secantes o sistemas de deshidratación específicos, con el fin de reducir el contenido de agua y mejorar la estabilidad y comportamiento del combustible.
- Se recomienda emplear instrumentación calibrada para el control de las variables del proceso y utilizar obligatoriamente equipos de protección personal durante todas las etapas experimentales, en especial en la fermentación y destilación, con el fin de garantizar la seguridad del operador y confiabilidad de resultados.
- Para trabajos futuros, se sugiere ampliar la evaluación del desempeño del bioetanol en el motor mediante ensayos bajo diferentes condiciones de operación, como variaciones de régimen y carga, medición de prestaciones y análisis de gases que permitan una caracterización más completa del comportamiento del combustible.

- Con base en los resultados obtenidos, se recomienda priorizar la caña de azúcar como biomasa principal para la producción de bioetanol con fines automotrices, debido a su mejor desempeño experimental, mayor pureza relativa y comportamiento más favorable en las pruebas de funcionamiento del motor.
- Finalmente, se recomienda realizar un análisis de viabilidad técnico-económica que permita estimar el costo real de producción de bioetanol por litro, identificar los insumos críticos del proceso y evaluar la factibilidad de escalar la producción a niveles piloto o comunitarios para su uso en mezclas bioetanol–gasolina.

BIBLIOGRAFÍA

- Academia de Ciencias de Morelos. (18 de abril de 2021). *Academia de Ciencias de Morelos*. Obtenido de <https://acmor.org/publicaciones/de-la-ca-a-de-az-car-al-bioetanol-la-transici-n-biotecnol-gica-que-morelos-necesita>
- (IEA), I. E. (2023). *Transport biofuels – Renewables 2023*. IEA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/transport-biofuels>
- (INEN), I. E. (2009). NTE INEN 2478: Etanol anhidro. Requisitos.
- (IPCC), I. P. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. IPCC. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Academia de Ciencias de Morelos. (20 de mayo de 2024). *Las microalgas: la esperanza para la producción de combustibles verdes*. Obtenido de Academia de Ciencias de Morelos, A.C.: <https://acmor.org/publicaciones/las-microalgas-la-esperanza-para-la-producci-n-de-combustibles-verdes>
- Ahmed Osman. (2021). *Environmental Chemistry Letters*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01273-0>
- Alvarado Ludeña, J. S. (2021). *Obtención de bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar mediante hidrólisis, fermentación y destilación*. Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21229>
- ASTM International. (2025). ASTM D4806 – Standard Specification for Denatured Fuel Ethanol. doi:10.1520/D4806-25
- Balat & Balat, M. H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, 2273–2282. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.015>
- Balat. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 551–573. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.001>
- Balat, M. &. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, 86(11), 2273–2282. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.015>
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 858–875.

- Cardona, C. A. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98(12), 2415–2457. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.002>
- Cherlinka, V. (02 de mayo de 2023). *Cultivo de caña de azúcar: De la siembra a la cosecha*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-cana-azucar/>
- Cojitambo Gaona, J. A. (2020). *Obtención de bioetanol a partir de residuos de yuca mediante hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica*. Quito. Obtenido de <https://repositorio.ute.edu.ec/entities/publication/fd3d39ea-ba13-4c97-b2eb-02c344f965f3>
- Demirbas, A. (2009). *Biofuels: Securing the planet's future energy needs*. Londres: Springer.
- Eralytics GmbH. (2025). *ERASPEC – Fuel Analyzer*. Obtenido de Eralytics: <https://eralytics.com/instruments/eraspec-fuel-analyzer/>
- FAO, F. a. (2018). *Bioenergy and food security: Supporting countries in the implementation of the sustainable development goals*. Roma: FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i7998en/I7998EN.pdf>
- Gajewski, M., Wyrąbkiewicz, S., & Kaszkowiak, J. (2025). Effects of Ethanol–Gasoline Blends on the Performance and Emissions of a Vehicle Spark-Ignition Engine. *Energies*.
- Google. (2025). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.com.ec/maps/place/Universidad+Polit%C3%A9cnica+Salesiana+del+Ecuador/@-2.8863868,-78.9894955,16.65z/>
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals (2nd ed.)*. McGraw-Hill Education.
- HRom. (17 de septiembre de 2025). *Cómo hacer COMBUSTIBLE a partir de PATATAS o AZÚCAR*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=AVPAGFTchw0>
- Hyundai Motor Company. (2005). *Hyundai Sonata EF – Engine Specifications (2.0L DOHC)*. Obtenido de Hyundai Global: <https://www.hyundai.com/worldwide/en>

- IEA, International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023*. París, Francia: International Energy Agency. Obtenido de https://www.iea.org/reports/renewables-2023?utm_source=chatgpt.com
- International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023*. IEA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. IEA.
- Jarabo, F. (2025). *Fermentación alcohólica: Esquema*. Obtenido de https://fjarabo.webs.ull.es/Adeje/Present/7_BioQ/Etanol3.htm
- Jiménez, E. R. (2021). *ACMOR*. Obtenido de la caña de azúcar al bioetanol, la transición biotecnológica que Morelos necesita: <https://acmor.org/publicaciones/de-la-ca-a-de-az-car-al-bioetanol-la-transici-n-biotecnol-gica-que-morelos-necesita>
- Larrea Rosero, J. F. (2019). *Obtención de bioetanol a partir de digestión enzimática de almidones (yuca, papa y camote)*. Quito. Obtenido de <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/10273?>
- Licht, F. (2022). *World Ethanol & Biofuels Report*. Agrimedia Ltd.
- López, K. J. (2024). *Análisis de la demanda de caña de azúcar para la producción de bioetanol en Ecuador*. Zamorano: Repositorio digital Universidad Zamorano.
- MAG, M. d. (2020). *Estadísticas agroproductivas del Ecuador*. Obtenido de <https://www.agricultura.gob.ec>
- Morales, J. A. (2020). *Producción de bioetanol a partir de caña de azúcar para uso energético en el Ecuador*. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Quito, Ecuador.
- Osman, A. I.-H.-M. (2021). Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4075–4118. doi:<https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0>
- Paredes, D. F. (2019). *Evaluación del potencial de biomasa agrícola para la producción de bioetanol en el Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Energía, Quito, Ecuador.

- REN21. (2024). *Renewables 2024 Global Status Report*. REN21 Secretariat. Obtenido de <https://www.ren21.net/gsr-2024/>
- Robles Ortega, D., & Salamea Cárdenas, B. (2023). *Producción de bioetanol a partir de hojas y cogollos de caña de azúcar tratados mediante explosión de vapor*. Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/e4b3c54b-7c70-4848-9f65-aac6d7710aeb>
- Segui, P. (2025). *OVACEN*. Obtenido de Biocombustibles: Qué son, tipos, ventajas y ejemplos: <https://ovacen.com/energias-renovables/biocombustibles/>
- Solucioning. (2025). *Solucioning*. Obtenido de <https://www.solucioning.com/producto/analizador-ftir-combustibles-modelo-eraspec/>
- Universidad Autónoma de Madrid. (septiembre de 2020). *Residuos Profesional*. Obtenido de UAM: residuos orgánicos para biocombustible y biofertilizantes: <https://www.residuosprofesional.com/uam-residuos-organicos-biocombustible-biofertilizantes/>
- Vasyl Cherlinka. (4 de abril de 2024). *Cultivo de papa: Preparación, siembra, cuidados y cosecha*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-papa/>
- VEVOR. (2020). *VEVOR*. Obtenido de VEVOR Destilador de Agua 12,3 L Máquina para el Agua Destilada Casera Destilación Filtro Purificador Acero Inoxidable: VEVOR Destilador de Agua 12,3 L Máquina para el Agua Destilada Casera Destilación Filtro Purificador Acero Inoxidable Destilador de Agua Water Distiller Filtro de Destilación de Agua Pura
- Walker & Stewart. (2016). *Saccharomyces cerevisiae* in the production of fermented beverages. *Beverages*, 2(4). doi:<https://doi.org/10.3390/beverages2040030>
- Zabed, H. et al. (2017). Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475–501. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.108>

ANEXOS

Anexo 1

Fabricación del serpentín de cobre utilizado en el condensador de la olla destiladora.



Fuente: (Autores)

Anexo 2

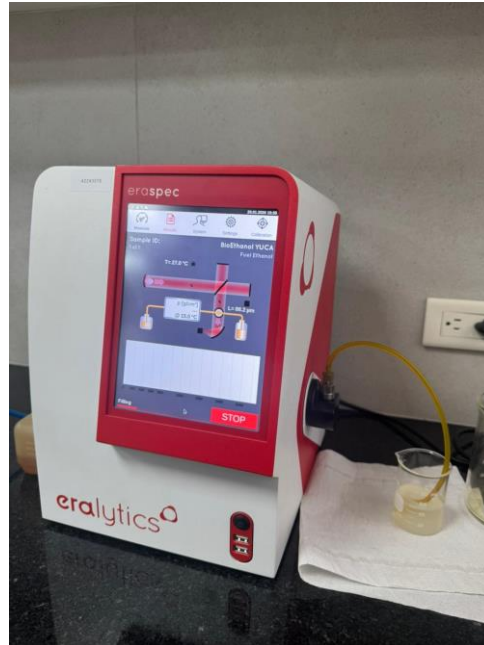
Carga del bioetanol en el tanque del sistema de alimentación para la prueba de funcionamiento del motor.



Fuente: (Autores)

Anexo 3

Equipo ERASPEC FTIR Fuel utilizado para la caracterización fisicoquímica del bioetanol.



Fuente: (Autores)

Anexo 4

Adecuación de la tapa de la olla destiladora para la instalación de termómetro y salida de vapor hacia el sistema de condensación.



Fuente: (Autores)

Anexo 5

Uso de equipo de protección personal (mandil de laboratorio) durante el análisis de muestras de bioetanol



Fuente: (Autores)