

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE
BIOETANOL EN UN REACTOR HÍBRIDO TIPO BATCH PARA
SU USO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

POR

ALEX NIBARDO DE LUCIO LÓPEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAestrÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

DICIEMBRE, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE
BIOETANOL EN UN REACTOR HÍBRIDO TIPO BATCH PARA
SU USO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

POR

ALEX NIBARDO DE LUCIO LÓPEZ

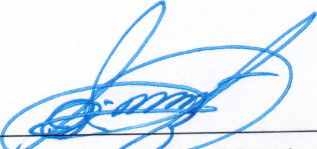
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAestrÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE, 2018

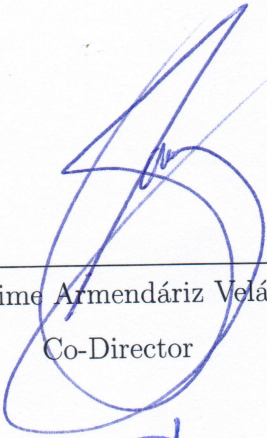
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «*Implementación del sistema de producción de bioetanol en un reactor híbrido tipo batch para su uso en un motor de combustión interna*», realizada por el alumno Alex Nibardo De Lucio López, con número de matrícula 1880621, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

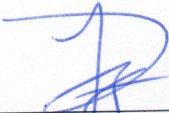
El Comité de Tesis



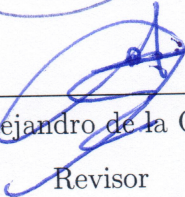
Dr. Simón Martínez Martínez
Director



M.C. Jaime Armendáriz Velázquez
Co-Director

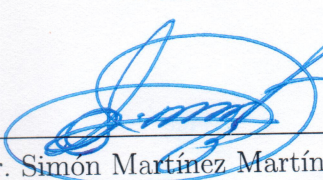


Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Revisor



Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado 



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, diciembre de 2018

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional, gracias por darme la fuerza en los momentos de debilidad y guiarme por el sendero del bien iluminando siempre mi camino.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mi madre Petrona López Alegría, a mi padre Armando De Lucio Marquez, por su inmenso apoyo, por sus consejos, sus valores y comprensión demostrado en todo momento, sacrificando gran parte de su vida en educarme para convertirme en una persona de provecho, gracias por compartir momentos felices, ambiciones, sueños e inquietudes, a quienes siempre sembraron en mi corazón esperanza y amor. Con todo mi amor, Gracias.

A mis hermanos, Ezequiel, Jhair y Cristian Armando De Lucio López por todos los buenos y malos momentos que hemos compartido juntos y por ser parte importante de mi vida.

A mi cuñada, Briseyda Peña y la pequeña sobrina Grethell Siomara De Lucio Peña, gracias por formar parte de esta familia De Lucio López, las quiero mucho.

A mi director de tesis, el Dr. Simón Martínez Martínez por haberme aceptado en su grupo de investigación y brindado apoyo y las facilidades que me fueron otorgadas en todo momento para la realización de esta investigación.

A mi co-asesor de tesis, el Dr. Jaime Armendáriz Velázquez por sus enseñanzas tanto fuera como dentro del aula de clases y su tiempo dedicado para la realización de este trabajo.

A todos los doctores y maestros del grupo de investigación, sobre todo el Dr. Simón Martínez Martínez por el apoyo brindado durante esta etapa, al Dr. Jaime Armendáriz Velázquez por todo su conocimiento compartido sobre el área de los

biocombustibles, al Dr. Fausto por dejarme ser parte de este grupo de trabajo, al Dr. Arturo Morales Fuentes por su disposición a siempre ayudarme cada vez que se me presentaba un problema, al Dr. Miguel Platas Garza por sus asesorías prestadas en el ámbito de la instrumentación, al Dr. Oscar de la Garza por su ayuda prestada en todo momento. Al resto de los miembros del grupo, Dr. Santos Méndez, MC. Miguel García, MC. Hugo Ramírez, Dr. Daniel de la Rosa y el Dr. Héctor García, por sus enseñanzas, aportes y amistad.

A mis compañeros de generación, Yonathan Heredia Aricapa, Sergio Borrego Alvarez, Luis Fernando Fong López, Ricardo Guevara Zavala que nos apoyamos mutuamente en esta etapa profesional, por todos los momentos y experiencias que compartimos juntos.

A todos mis amigos, compañeros y ex-compañeros del programa de maestría, Alfredo, Víctor, Toño, Juan Carlos, Lalo, Liz, Guillermo, Sori, Ceci, Mayra, Cristian, Eder, Carlos, Rossio, Fer, Vanessa, Alan, Andrés, Holman quienes han hecho de estos dos años una experiencia inolvidable para mí. En especial a Fernando Rúa, Ricardo Guevara Zavala y Pedro Damian Hernández por su valioso apoyo, observaciones y sugerencias para el mejoramiento de este trabajo, a Ulises Rivera, Yonathan Heredia, fernando Fong, Sergio Borrego, que gran parte de este trabajo fue gracias a ustedes. A todos los servicios sociales que participaron con la mejor de las actitudes en las tareas del Laboratorio de Ciencias de los Combustibles.

A los trabajadores de taller de soldadura, al equipo de compras, almacén y proveedores todos ellos contribuyendo a la consecución de los objetivos de este trabajo. A la señora Socorro por mantener siempre limpio el área del LIITE.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL, por el apoyo brindado a lo largo de este programa académico, especialmente al grupo de Energía Térmica y Renovables (GETR) por haberme dado la oportunidad de trabajar en el desarrollo de esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del Gobierno de

México, por la financiación de mis estudios de maestría (beca: 612616), y por apoyar esta investigación a través del LaNDACBio (proyecto: 239943).

ÍNDICE GENERAL

Nomenclatura	xxii
Resumen	xxv
Abstract	xxvii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.1.1. Bioetanol en el Mundo	2
1.1.2. Bioetanol en México	4
1.2. Antecedentes	9
1.2.1. Breve historia del bioetanol	9
1.2.2. Breve historia del motor CFR	10
1.2.3. Proceso de producción de bioetanol mediante reactores	11
1.2.4. Mezclas gasolina-etanol	16
1.3. Hipótesis	17
1.4. Objetivos	17

1.4.1. Objetivo general	17
1.4.2. Objetivos específico	17
2. Marco teórico	19
2.0.1. Motor de encendido provocado	20
2.1. El proceso de la combustión en motores de encendido provocado . . .	20
2.2. El motor CFR de compresión variable. Modelo: F1/F2	22
2.3. Naranja	24
2.3.1. Origen	24
2.3.2. Taxonomía y morfología	25
2.4. Biocombustibles	25
2.4.1. Biocombustibles líquidos	29
2.5. Bioetanol	30
2.5.1. Ventajas del bioetanol	31
2.5.2. Desventajas del bioetanol	32
2.5.3. Propiedades del bioetanol	33
2.5.4. Proceso de producción de bioetanol	35
2.5.5. Fermentación	37
2.5.6. Destilación	45
3. Herramientas experimentales	49
3.1. Método de destilación a presión atmosférica	51

3.2. Método de determinación del poder calorífico	52
3.2.1. Bomba calorimétrica	52
3.3. Método de obtención de gravedad específica	56
3.4. Cromatografía de gases y masas	58
3.5. Motor de combustión interna: tipo CFR	60
4. Metodología	63
4.1. Descripción del reactor híbrido tipo batch para la producción de bio- combustibles: biodiésel y bioetanol	64
4.2. Implementación de ampliaciones planteadas para el reactor híbrido tipo batch	66
4.2.1. Diseño de los tanques de solución ácida y base	66
4.2.2. Características principales del tanque fermentador	67
4.2.3. Diseño del condensador	70
4.2.4. Características principales del condensador	79
4.2.5. Control del proceso de fermentación y destilación	81
4.3. Metodología del proceso de fermentación y destilación	89
4.3.1. Diseño experimental del proceso de fermentación del jugo de naranja a nivel laboratorio	89
4.3.2. Desarrollo del diseño experimental a nivel laboratorio	91
4.3.3. Proceso de fermentación a nivel laboratorio	92
4.3.4. Proceso de fermentación a nivel reactor	97

4.3.5. Proceso de destilación a nivel reactor	100
4.4. Evaluación de la calidad del bioetanol	103
4.4.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del bioetanol	104
4.5. Preparación y descripción de las mezclas de combustibles	105
4.6. Matriz de ensayos experimentales	107
4.6.1. Máxima presión en cámara	109
4.6.2. Duración de la primera fase de combustión a diferentes RC . .	109
4.6.3. Puntos de autoignición	110
5. Resultados	111
5.1. Puesta a punto del reactor híbrido tipo batch para la producción de bioetanol	112
5.2. Resultados experimentales de los parámetros de mediciones a nivel laboratorio	113
5.2.1. Comportamiento experimental de temperatura	113
5.2.2. Comportamiento experimental del pH	114
5.2.3. Comportamiento experimental de °Brix	115
5.2.4. Comparación de los resultados preliminares de las muestras F8, F9 y F10	117
5.3. Resultados experimentales a nivel reactor	121
5.4. Destilación a nivel reactor	123
5.5. Análisis de energía en el proceso de obtención del bioetanol	124

5.6. Caracterización fisicoquímica del bioetanol	126
5.6.1. Poder calorífico	126
5.6.2. Densidad a 25 °C	127
5.6.3. Evaluación de la calidad del bioetanol	128
5.7. Presión máxima promedio en cámara de combustión	132
5.8. Duración de la primera fase de la combustión	134
5.9. Presencia intensidad de autoignición	135
6. Conclusiones y trabajos futuros	138
6.1. Conclusiones	139
6.2. Trabajos futuros	141
A. Anexos	143
A.1. Dimensiones de los tanques de solución ácida y base	143
A.2. Brida acoplada a la superior del reactor	144
A.3. Brida acoplada a la parte superior del condensador	144
A.4. Tubo para la salida del vapor	145
A.5. Serpentín	145
A.6. Carcaza del condensador	146
A.7. Plano del condensador	146
A.8. Estructura para los tanques de la solución ácida y base	147
A.9. Pieza para el potenciómetro	147

A.10. Conector macho tipo cpi	148
A.11. Conector macho tipo cpi	149
A.12. Conector macho tipo cpi	150
A.13. Manual reactor híbrido tipo batch	151
A.14. Curva de liberación de calor de los poderes caloríficos	152
Referencias	156

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Estimación de energía renovables consumo final, 2018 [5]	3
1.2. Principales países productores de etanol [8]	4
1.3. Matriz energética en México [9]	6
1.4. Producción y consumo de alcohol etílico en México [11]	8
1.5. Primer motor CFR creado por <i>Waukesha</i> . Adaptada de Pablo Gómez-Gordo Villa, 2017 [15]	10
1.6. Otros modelos de <i>Waukesha</i> . Adaptada de Pablo Gómez-Gordo Villa, 2017 [15]	11
1.7. Vista frontal del diseño del reactor de fermentación [18]	13
1.8. Diseño del reactor de destilación [18]	14
1.9. Medición de variables [19]	15
1.10. Serpentín helicoidal de un biorreactor tipo batch [20]	16
2.1. Ciclo de trabajo del motor de gasolina de 4 tiempos [23]	21
2.2. Modelo F1/F2 de gasolina [24]	23
2.3. Partes del fruto de naranja. Fuente infoAgro [25]	25

2.4. En el proceso de fotosíntesis, las plantas convierten la energía radiante del sol en energía química en forma de glucosa [32]	27
2.5. Biocombustibles: desde la materia prima hasta su uso final	28
2.6. Proceso de conversión de biomasa a etanol [43]	36
2.7. Curva de crecimiento de la levadura en sus diferentes fases [18]	39
3.1. Diagrama de flujo del reactor híbrido tipo batch para la producción de bioetanol	50
3.2. Equipo de destilación a nivel laboratorio a presión atmosférica	51
3.3. Componentes principales que conforman el calorímetro	53
3.4. Curva de liberación de calor, obtenida con datos de temperatura del calorímetro	56
3.5. Lectura escala hidrómetro. Adaptada de Flor De Lis Corral Gómez [56]	58
3.6. Cromatógrafo de gases y masas modelo CLARUS SQ 8 GC/MS	59
3.7. Esquema de un cromatógrafo de gases [58]	60
3.8. Motor de combustión interna tipo CFR de compresión variable	61
4.1. Diseño de la maqueta antes de las ampliaciones realizadas [54]	65
4.2. Diseño del reactor de fermentación	68
4.3. Diseño del condensador acoplado al reactor batch	80
4.4. Sensores utilizados en el reactor	82
4.5. Resistencia eléctrica de inmersión monofásica	82
4.6. Sensor de nivel LR2759 y termopar tipo K	83

4.7. Manómetro de presión analógico	83
4.8. Válvulas solenoide en acero inoxidable	84
4.9. PH transmisor de la marca RIXEN	84
4.10. Bomba de succión sumergible	85
4.11. Fuente de poder	85
4.12. Panel de control tras la modificación realizada del programa en el Software LabVIEW	86
4.13. Sistema de adquisición de datos	87
4.14. Módulo NI-9203	87
4.15. Módulo NI-9472	88
4.16. Diseño CAD del prototipo tras las ampliaciones realizadas	88
4.17. Diagrama del diseño de experimentos	89
4.18. Esquema del proceso de fermentación y destilación	92
4.19. Jugo de naranja natural	93
4.20. Filtración por gravedad	93
4.21. Pasteurización del jugo	94
4.22. Agregado de levadura comercial (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	95
4.23. Fermentación F10 con una agitación de 300 rpm	96
4.24. Inicio de la fermentación a nivel reactor	98
4.25. Lectura de parámetros con el software LabVIEW	99
4.26. Diagrama del proceso de fermentación	100

4.27. Lectura de los tres rangos de temperatura con el software LabVIEW	101
4.28. Proceso de destilación a nivel reactor	102
4.29. Proceso de destilación a nivel reactor	103
5.1. Puesta a punto del reactor híbrido tipo batch para fermentación y destilación	112
5.2. Variación temporal de la temperatura para cada fermentación	114
5.3. Comportamiento experimental de pH	115
5.4. Comportamiento experimental de °Brix	116
5.5. Comparación de temperatura de las fermentaciones F8, F9 y F10	118
5.6. Comparación del pH de las fermentaciones F8, F9 y F10	119
5.7. Comparación de °Brix de las fermentaciones F8, F9 y F10	120
5.8. Comportamiento experimental de parámetros obtenidos en la fermen- tación	123
5.9. Comparación del poder calorífico	127
5.10. Comparación de la densidad	128
5.11. Tiempos de retención de la cromatografía de gases del etanol absoluto de laboratorio y tolueno	129
5.12. Tiempos de retención de la cromatografía de gases del bioetanol pro- ducido en el reactor	130
5.13. Obtención de la curva de presión en cámara promedio a partir de 100 curvas de combustión	132
5.14. Presión máxima promedio para gasolina y mezclas con bioetanol	133

5.15. Duración de la primera fase de combustión para las mezclas gasolina-bioetanol	135
5.16. Intensidad de autoignición promedio a las mezclas gasolina-bioetanol	136
A.1. Dimensiones de los tanques de solución ácida y base	143
A.2. Dimensiones de la brida	144
A.3. Dimensiones de la brida	144
A.4. Dimensiones del tubo para la salida del vapor	145
A.5. Dimensiones del serpentín	145
A.6. Dimensiones de la carcasa del condensador	146
A.7. Diagrama esquemático del prototipo	146
A.8. Dimensiones de la estructura para los tanques de las soluciones	147
A.9. Conexión tipo L para el (pH-metro)	147
A.10. Cuerpo del conector para tubo de un 1/4	148
A.11. Cono reductor del conector	149
A.12. Tuerca del conector	150
A.13. Manual del funcionamiento del reactor híbrido tipo batch	151
A.14. Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 78 °Brix	152
A.15. Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 78 °C segunda destilación	152
A.16. Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 85 °C segunda destilación	153
A.17. Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 90 °C segunda destilación	153

A.18. Poder calorífico inferior alcohol etílico absoluto laboratorio	154
A.19. Tiempos de retención de la cromatografía del etanol absoluto de laboratorio	154
A.20. Tiempos de retención de la cromatografía del bioetanol a nivel reactor	155

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Producción nacional de energía primaria	5
1.2. Consumo final total de energía (Petajoules)	7
2.1. Características para los dos métodos estandarizados	23
2.2. Taxonomía y morfología	25
2.3. Propiedades fisicoquímicas y termodinámicas del bioetanol	33
2.4. Propiedades de la gasolina y del etanol hidratado	34
2.5. Diferentes materias primas para la producción de bioetanol y su producción potencial	37
4.1. Rangos de las variables independientes	90
4.2. Rangos de las variables independientes	96
4.3. Propiedades de densidades y relaciones A/F	105
4.4. Propiedades de las mezclas gasolina-bioetanol	107
4.5. Matriz de ensayos diseñada	108
5.1. Condiciones óptimas de fermentación (muestra F8)	117

5.2. Condiciones óptimas de fermentación (muestra F10)	121
5.3. Rendimiento obtenido de bioetanol	124
5.4. Energía consumida en el reactor híbrido	125
5.5. Energía final obtenida	125
5.6. Resultados de la cromatografía de gases	131
5.7. Cromatografía de gases (% de pureza)	131

NOMENCLATURA

Re	Número de Reynolds	[-]
Nu	Número de Nusselt	[-]
W	Potencia	[J/s]
D	Diámetro del reactor	[m]
N	Velocidad rotacional de la agitación	[rpm]
V	Volumen	[m ³]
δ	Densidad	[kg/m ³]
H	Altura del reactor	[m]
T	Temperatura	[°C]
C_p	Calor específico	[kJ/kg°C]
P	Presión de operación	[bar]
P_h	Presión hidrostática	[bar]
g	Gravedad	[m/s ²]
P_{atm}	Presión atmosférica	[bar]
SST	Sólidos solubles totales	[°Brix]
h_{fg}	Calor latente de vaporización	[kJ/kg]
\dot{m}	Flujo másico	[kg/h]
t	Tiempo	[Segundos]
Q_s y Q_L	Calor sensible y latente	[kJ/h]
ν	Velocidad cinemática	[m ² /s]
μ	Velocidad dinámica	[kg/m·s]
h_i	Coefficiente de transferencia de calor	[W/m ² °C]

°C	Grados Celsius
PJ	Petajoules
h	Horas
L	Litros
mL	Mililitros
pH	Potencial de Hidrógeno
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
in	Pulgadas
rpm	Revoluciones por minuto
cm	Centímetros
m ³	Metros cúbicos
g	Gramos
V	Volt
A	Ampere
kg	Kilogramos
atm	Atmósferas
PCI	Poder calorífico inferior
kPa	Kilopascalas
AI	Autoignición
DPFC	Duración de la primera fase de combustión
RC	Relación de compresión
MEP	Motor de encendido provocado
MON	Número de octano del motor
PMS	Punto Muerto Superior
PMI	Puerto Muerto Inferior
ADP	Adenosín difosfato
ATP	Adenosín trifosfato

CFR	Investigación cooperativa de combustible
EIA	Administración de Información Energética
ETBE	Etil Ter-butil Éter
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FFV	Vehículo de combustible flexible
MTBE	Metil Ter-butil Éter
PEMEX	Petróleos Mexicanos
SENER	Secretaria Nacional de Energía
TAME	Teramil Metil Éter

RESUMEN

El estudio de los biocombustibles ha venido creciendo en búsqueda de nuevas fuentes energéticas de menor costo, en comparación a los altos precios de los combustibles obtenidos a partir del petróleo.

Debido a lo anterior, el biocombustible renovable más prometedor hoy en día es el bioetanol utilizado actualmente en el sector de transporte. Este biocombustible cuenta con la característica de ser producido a partir de biomasa y es factible emplearlo como fuente de energía renovable.

En la presente investigación se estudia la implementación del sistema de producción de bioetanol en un reactor híbrido tipo batch para su uso en un motor de combustión interna. Se diseñaron y construyeron para los propósitos de este proyecto: un intercambiador de calor (destilador), dos tanques de solución ácida y base, tomando en cuenta los parámetros cinéticos involucrados en el proceso de fermentación y destilación. Se emplea un sistema de indicadores para el monitoreo y control de los parámetros durante la producción del biocombustible en el reactor.

Se desarrolló una metodología del proceso de fermentación y destilación con base al diseño experimental realizado a nivel laboratorio para la obtención del bioetanol. Se realizó la fermentación a partir del jugo de naranja utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* con el objetivo de realizar la conversión de azúcares a bioetanol.

La fermentación se llevó a cabo a una temperatura entre 28 y 32 °C, pH de

4.0 a 4.5 en medio anaerobio en agitación constante a 300 rpm. Estos parámetros son óptimos para el crecimiento de la levadura durante la fermentación. Se realizó la separación del alcohol, empleando una destilación con el reactor. Finalmente, se procedió a la caracterización fisicoquímica, el análisis de la cromatografía de gases para conocer la pureza y por último, la inyección en un motor CFR, con el objetivo de validar la calidad de la mezcla gasolina-bioetanol en dos composiciones E5 % y E10 %. De estas mezclas se evaluaron los niveles de presión máxima promedio en cámara, duración de la primera fase de combustión y valores de autoignición.

Con esta investigación se obtiene la metodología para la producción de bioetanol a mediana escala, a partir de una materia prima de origen orgánico y cuyo proceso da pie al estudio de biocombustibles a partir de diferentes tipos de biomasa con alto contenido de sacarosa, obteniendo cantidades razonables con las especificaciones deseadas para su evaluación en diferentes tipos de motores de combustión interna.

ABSTRACT

The study of biofuels has been growing in search of new sources of energy at lower cost, compared to the high prices of fuels obtained from oil.

Due to the above, the most promising renewable biofuel today is the bioethanol currently used in the transport sector. This biofuel has the characteristic of being produced from biomass and it is feasible to use it as a source of renewable energy.

In the present investigation, the implementation of the bioethanol production system in a hybrid batch reactor for use in an internal combustion engine is studied. They were designed and built for the purposes of this project: a heat exchanger (distiller), two tanks of acid solution and base, taking into account the kinetic parameters involved in the fermentation and distillation process. A system of indicators is used to monitor and control the parameters during the production of the biofuel in the reactor.

A methodology of the fermentation and distillation process was developed based on the experimental design carried out at the laboratory level to obtain bioethanol. Fermentation was carried out from orange juice using the yeast *Saccharomyces cerevisiae* with the aim of converting sugars to bioethanol.

The fermentation was carried out at a temperature between 28 and 32 °C, pH 4.0 to 4.5 in anaerobic medium under constant stirring at 300 rpm. These parameters are optimal for the growth of the yeast during fermentation. The separation of the alcohol was carried out, using a distillation with the reactor. Finally, the phy-

sicochemical characterization, the gas chromatography analysis to know the purity and finally, the injection in a CFR engine were carried out, in order to validate the quality of the gasoline-bioethanol mixture in two compositions E5 % and E10 %. From these mixtures were evaluated the levels of average maximum pressure in the chamber, duration of the first phase of combustion and autoignition values.

With this research we obtain the methodology for the production of medium-scale bioethanol, from a raw material of organic origin and whose process gives rise to the study of biofuels from different types of biomass with high content of sucrose, obtaining reasonable quantities with the desired specifications for evaluation in different types of internal combustion engines.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta, en primer lugar, la motivación para la realización de esta investigación. A continuación se detallan los antecedentes del campo de conocimientos en el que se enmarca este estudio. Por último, se expone la justificación, hipótesis junto con los objetivos de carácter general como específicos, planteados para la realización de la investigación.

1.1 MOTIVACIÓN

Actualmente el mundo se encuentra con dos grandes crisis: el agotamiento de los combustibles fósiles y la degradación ambiental causada por los combustibles no renovables. Por lo consiguiente, el consumo excesivo de los combustibles fósiles ha llevado a la reducción de los recursos de carbono subterráneos. Por otro lado, a partir del siglo XX con el desarrollo de la población, la expansión de la producción industrial y el uso intensivo de tecnologías comenzó a crecer la preocupación por el agotamiento de las reservas del petróleo y el deterioro ambiental. Esto provocó que científicos se dieran a la búsqueda de diversas fuentes de combustibles alternativos los cuales prometen una correlación armoniosa con el desarrollo sostenible, la conservación de la energía, la eficiencia y la preservación del medio ambiente [1].

1.1.1 BIOETANOL EN EL MUNDO

A nivel mundial aproximadamente el 90% de la energía consumida proviene de fuentes no renovables, por lo que estos recursos fósiles se están agotando aceleradamente y su tasa de disminución es cada vez mayor [2]. Lo anterior ha generado una creciente preocupación por la seguridad energética y el cambio climático, lo que ha motivado a que distintas naciones se den a la búsqueda de fuentes alternas de energía renovables [3].

En general, las fuentes de energía se clasifican como renovables y no renovables; observando la Figura 1.1 entre las primeras se encuentran la energía eólica, hidráulica, solar, geotérmica y la energía de la biomasa. Dentro de las energías no renovables se encuentran el petróleo, el gas natural y la energía nuclear [4].

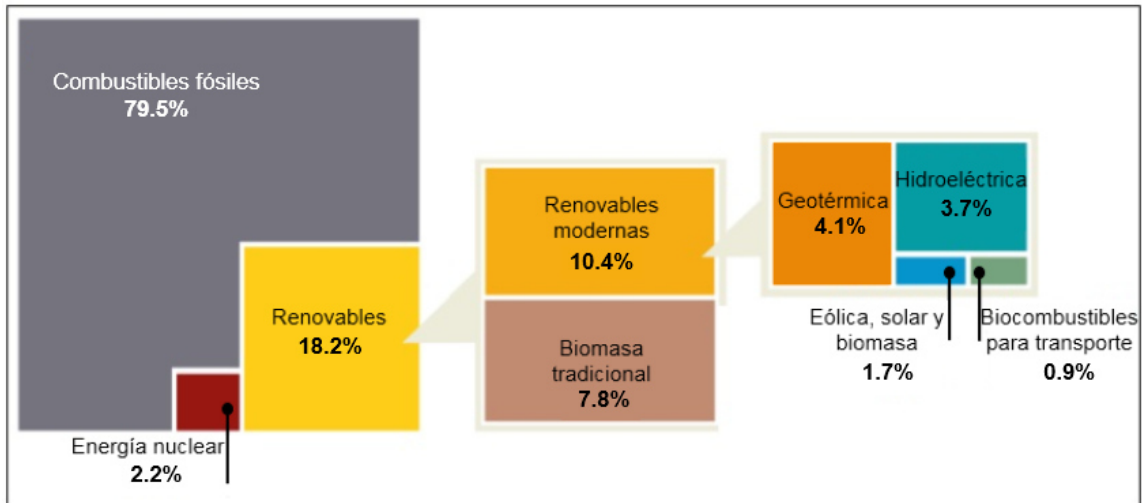


Figura 1.1: Estimación de energía renovables consumo final, 2018 [5]

Según la Figura 1.1 a partir del 2016, estas energías alternativas proporcionaron el 18.2% del consumo mundial de la energía final. De este porcentaje total la biomasa tradicional representa el 7.8% y las energías modernas aumentaron su participación relativa, siendo el 10.4% del consumo en el mundo. La energía hidroeléctrica representó un estimado de 3.7%, otras fuentes de energía alternativas comprendían el 1.7%, mientras que la energía de calor renovable representó el 4.1% y por último, los biocombustibles de transporte proporcionaron alrededor de 0.9% [5].

En lo que respecta a las energías de la biomasa, la producción de bioetanol es una forma de reducir tanto el consumo del petróleo como la contaminación ambiental [4, 6].

En la Figura 1.2 se muestran los principales países productores de bioetanol a nivel mundial del 2007 al 2015. En el año 2015 la producción mundial de bioetanol alcanzó su punto máximo después de un descenso en 2011 y 2012. Actualmente el bioetanol representa más del 94% de la producción mundial de biocombustibles [6], donde Estados Unidos es el mayor productor de bioetanol, ya que en el 2015 produjo cerca de 15 mil millones de galones. Juntos, EE.UU. y Brasil producen el 85% de etanol del mundo. Gran parte del etanol que se produce en EE.UU. se produce a

partir de maíz, mientras que Brasil utiliza principalmente caña de azúcar [7, 8].

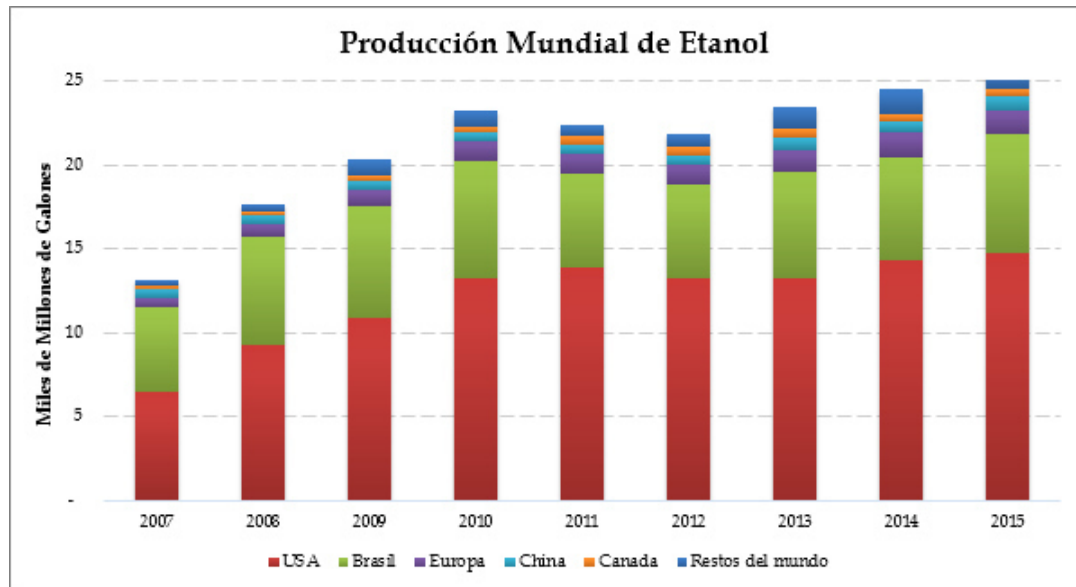


Figura 1.2: Principales países productores de etanol [8]

Cualquier país con una economía basada en la agronomía, puede utilizar la tecnología actual para la fermentación de bioetanol. Esto es posible porque durante las dos últimas décadas, la tecnología para la producción de bioetanol a partir de fuentes no alimenticias de plantas se ha desarrollado hasta el punto en el que la producción a gran escala será una realidad en los próximos años [6].

1.1.2 BIOETANOL EN MÉXICO

Actualmente el sector energético nacional se encuentra globalizado por el uso de energía primaria como carbón, petróleo crudo, gas natural, etc. De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER) la producción nacional de energía primaria en el año 2016 fue de 7,714.23 PJ, 6.6% menor a la registrada en el 2015 (8,261.029 PJ). En la Tabla 1.1 se puede apreciar la producción de energía primaria en unidades de petajoules.

En buena medida se muestra la caída de 4.8 % en la producción del petróleo crudo comparado con el año 2015, sin embargo, prevaleció como el principal energético primario con mayor producción a nivel nacional.

Tabla 1.1: Producción nacional de energía primaria

	2015	2016	Variación porcentual (%) 2016/2015	Estructura porcentual 2016 %
Total	8261.03	7714.23	-6.62	100
Carbón	287.69	254.17	-11.65	3.29
Hidrocarburos	7203.85	6694.85	-7.07	86.79
Petróleo crudo	5067.69	4826.85	-4.75	62.57
Condensados	98.83	88.31	-10.64	1.14
Gas natural	2037.33	1779.68	-12.65	23.07
Nucleoenergía	120.41	109.95	-8.68	1.43
Renovables	649.09	655.26	0.95	8.49
Hidroenergía	111.21	110.51	-0.63	1.43
Geoenergía	134.53	132.59	-1.44	1.72
Energía solar	10.15	11.19	10.18	0.15
Energía eólica	31.48	37.36	18.67	0.48
Biogas	1.87	1.91	2.38	0.02
Biomasa	359.84	361.69	0.51	4.69
Bagazo de caña	107.00	110.14	2.93	1.43
Leña	252.84	251.56	0.51	3.26

Por lo consiguiente, en lo que respecta a los bioenergéticos, la producción de biogás tuvo un incremento del 2.4 %, finalizando en 1.91 PJ, mientras que la biomasa, que está integrada por bagazo de caña (30.5 %) y leña (69.5 %), pasó de 359.84 PJ en 2015 a 361.70 PJ en 2016, incrementando 0.5 %.

En la Figura 1.3 se puede apreciar que la producción de hidrocarburos con-

tinuó predominando la canasta de energía primaria en México en 2016, con una participación de 86.8 % al sumar 6694.85 PJ. De dicha cantidad de energía, 62.6 % corresponde al petróleo crudo, 23.1 % gas natural y el 1.1 % restante a condensados.

En cuanto a la participación de otras fuentes, como lo son las energías renovables, se siguen viendo reducidas, contribuyendo aproximadamente el 10 %.

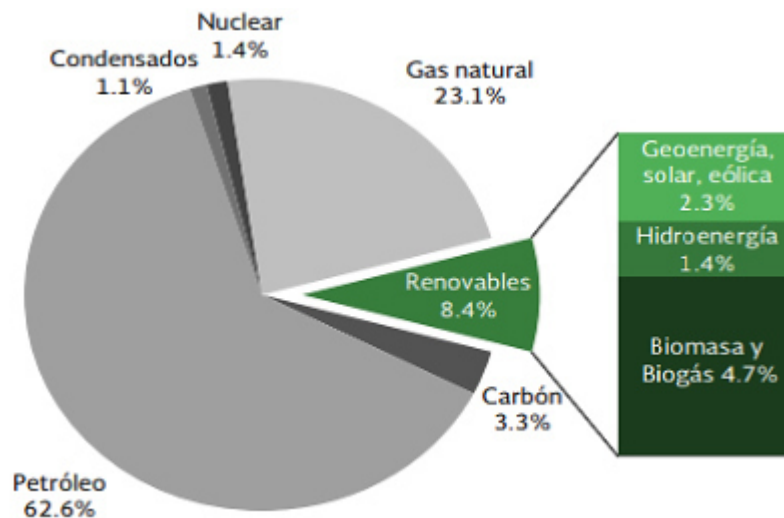


Figura 1.3: Matriz energética en México [9]

Por otra parte, el consumo total no energéticos y energéticos son las dos variables que componen al consumo final de energía, mismo que en 2016 mostró un incremento de 3.7 % al finalizar con 5,479.26 PJ como se muestra en la Tabla 1.2.

En la Tabla 1.2 se observa el 3.2 % del consumo final de 2016, corresponde al consumo no energético total que se refiere a aquellos productos energéticos y no energéticos derivados del petróleo y utilizados como insumos para distinta producción. En lo que respecta al consumo de combustible en el sector transporte totalizó 2,484.95 PJ en 2016, 5.2 % mayor que en 2015. Esto se tradujo en un incremento importante en el consumo de energéticos en sus subsectores como el autotransporte, aumentando en un 5.3 % respecto a 2015 [9, 10].

Tabla 1.2: Consumo final total de energía (Petajoules)

	2015	2016	Variación porcentual (%) 2016/2015	Estructura porcentual 2016 %
Consumo total	5,283.13	5,479.26	3.71	100
No energético	188.39	173.69	-7.80	3.2
Petroquímica de Pemex	113.22	99.21	-12.38	1.8
Otras ramas	75.17	74.48	-0.91	1.4
Energético	5,094.74	5,305.57	4.14	96.8
Transporte	2,361.75	2,484.95	5.22	45.4
Industrial	1,601.84	1680.79	4.93	30.7
Resid, comer y púb	952.06	959.58	0.79	17.5
Agropecuario	179.09	180.26	0.65	3.3

En cuanto a la producción y consumo de alcohol etílico en México, el país depende de las importaciones, debido principalmente al alto costo de la producción nacional y a los elevados impuestos que han impedido el desarrollo del sector.

Ante la necesidad de diversificar el uso de la caña de azúcar, principal materia prima para la producción de alcohol industrial y para consumo humano, el gobierno mexicano planea el impulso a la producción nacional; por un lado, para sustituir importaciones, y por el otro, ligar esta agroindustria al sector energético para la producción de alcohol carburante.

Desde hace algunos años la producción de alcohol etílico en el país ha venido creciendo del 2001 al 2014 en un 67-68 %. El tamaño del mercado de alcohol etílico se estima alrededor de 360-380 millones de litros anuales, de las cuales la mitad son importaciones. El 60-70 % de la producción nacional lo hacen destilerías llamadas independientes y el resto es producción de los ingenios azucareros (ver Figura 1.4).



Figura 1.4: Producción y consumo de alcohol etílico en México [11]

Oficialmente no hay producción de alcohol carburante en México, este normalmente se adquiere mediante una empresa comercializadora de los Estados Unidos a partir del maíz. Esto, debido a que Pemex ha sido renuente a sustituir el **MTBE**, **ETBE** y el **TAME** [11].

En los laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL, se cuenta con un reactor híbrido tipo batch para la producción de biocombustibles; sin embargo, sólo se ha llegado a la producción de biodiésel en dicho equipo, razón por la cual con el desarrollo del presente trabajo, se busca producir bioetanol a partir de jugo de naranja. Se hace un seguimiento detallado de todo el proceso de fermentación, desde la llegada del jugo fresco, hasta lograr todo el proceso de conversión de los azúcares en etanol.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 BREVE HISTORIA DEL BIOETANOL

De acuerdo con la U.S. Energy Information Administration, el etanol como combustible se ha utilizado desde hace décadas. En el año de 1826 se usó por primera vez el etanol para encender un motor y en el año de 1876, Nicolaus Otto, inventor del flamante motor de combustión interna de cuatro tiempos, usó este combustible para alimentar dicho motor [12]. Los combustibles han seguido un curso paralelo al de los motores, respondiendo a las necesidades del mercado, cambios sociales y a la conciencia del medio ambiente. A lo largo de estos años, los mayores impactos se vivieron durante las dos guerras mundiales. Así mismo, las primeras gasolinas surgieron a principios del siglo XX, las cuales eran muy volátiles, pocas densas y de bajo octanaje. Sin embargo, a partir de la primera guerra mundial, las gasolinas mejoraron y esto permitió grandes aumentos de eficiencia en los motores. Dicho esto, una de las principales mejoras fue el aumento de las relaciones de compresión [13].

Durante las décadas de 1920 y 1930, empezó a utilizarse por primera vez etanol mezclado con gasolina para incrementar su octanaje. En el año de 1970 comenzó la industria actual del etanol, con el aumento del precio de los combustibles de carácter fósiles y las preocupaciones medio ambientales con el uso del plomo como aditivo en la gasolina para aumentar su número de octano. Y en la década de 1990 se empezó a utilizar el etanol como un compuesto oxigenado para controlar la emisiones de CO [12].

1.2.2 BREVE HISTORIA DEL MOTOR CFR

En el año 1920 se formó el comité *Cooperative Fuel Research* (CFR); su principal función era medir y comparar de forma correcta las características de combustión de las gasolinas. En el año 1928, el comité CFR estandarizó un motor de un solo cilindro para llevar a cabo la prueba de golpe de la gasolina. Con el desarrollo del motor CFR, la industria automotriz y de petróleo ahora tenían un estándar universalmente aceptado para definir la calidad del combustible, esto permitió a las refinerías y a los fabricantes de motores adaptarse a sus productos de una forma más eficaz. El diseño básico para su construcción fue desarrollado por *Waukesha Motor Company*. Este primer motor fue diseñado y construido en menos de 45 días por esta compañía (Figura 1.5) [14].

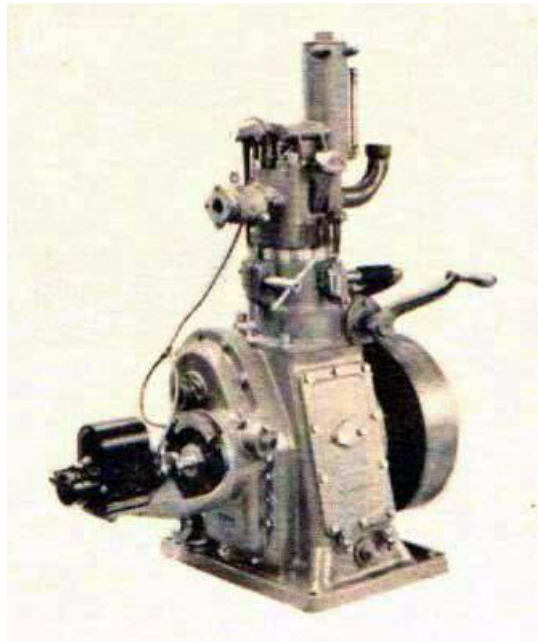


Figura 1.5: Primer motor CFR creado por *Waukesha*. Adaptada de Pablo Gómez-Gordo Villa, 2017 [15]

Por otra parte, diversas compañías han empleado motores que siguen aquella idea y que sirven para cuantificar la resistencia a la auto-inflamación de los distintos combustibles (típicamente gasolinas). Este motor ha evolucionado hacia un

nivel electrónico más sofisticado, con pequeños cambios mecánicos, pero ninguno se compara con el motor CFR creado por *Waukesha*, que hasta hoy en día su diseño permanece con la misma geometría en la cámara de combustión.

En la actualidad, dicho estándar continua siendo el único método para la medición de octanaje de gasolinas, así mismo, otros diseños de la compañía *Waukesha* predominan por haber sido utilizados en la industria petrolera; como el *CFR Dyno*, *Octane*, *Cetane*, y *aviation Super Charged*, dichos motores fueron fabricados durante la Segunda Guerra Mundial, especialmente, el motor *Aviation Super Charged*, que permitió el desarrollo de gasolinas de octanaje 100 y 115/145 para los aviones de combate [15].

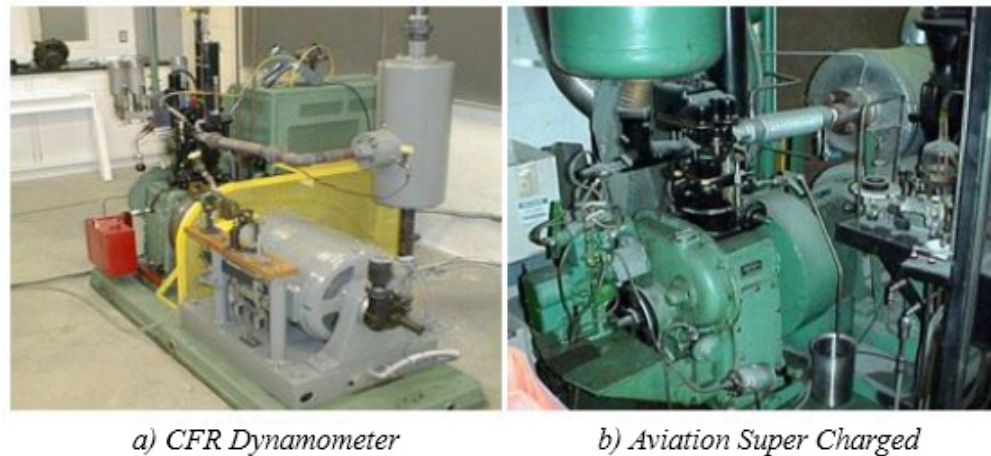


Figura 1.6: Otros modelos de *Waukesha*. Adaptada de Pablo Gómez-Gordo Villa, 2017 [15]

1.2.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL MEDIANTE REACTORES

Espinal *et al* 2009 [16] diseñaron y construyeron un equipo capaz de producir alcohol etílico, con una concentración de mezcla de 3 litros a presión atmosférica a partir de sustancias sacarinas (melaza, sorgo, remolacha y caña de azúcar, etc.).

El prototipo consta de un tanque donde se vierte la materia prima, una bomba de desplazamiento continuo, un esterilizador, una tanque en el cual se lleva a cabo la fermentación y un destilador para la recuperación del alcohol etílico. Como resultado, obtuvieron 1.5 litros de etanol a una temperatura de destilación de 81.9 °C. El tiempo de fermentación fue de 60 a 72 horas, a una temperatura entre 28 y 32 °C, manteniendo un pH del 4.5.

En el año 2010 Palate *et al* [17] realizaron un trabajo que consiste en el diseño de un sistema para fermentación y destilación con capacidad de 20 litros utilizando jugo de papa, zanahoria, remolacha y lacto de suero; este diseño consta de un generador de vapor, un condensador acoplado a un subsistema de enfriamiento por medio de circulación de agua. Como resultados, obtuvieron 2200 mL del volumen recuperado de etanol, con grado alcohólico de 83 %, obteniendo un pH de 4.6.

Santis 2011 [18] realizó un trabajo que consiste en el diseño y la construcción de los reactores de fermentación y destilación, así como la caracterización para la producción de bioetanol; con respecto al reactor fermentador, está diseñado con base a los parámetros cinéticos involucrados en este proceso (temperatura, CO₂ y pH), Tiene una capacidad volumétrica de 100 litros, cuenta con fondo cónico, agitador tipo ancla, enchaquetado, soporte para el motor reductor; Además, se realiza una descripción de los componentes: motor-reductor, eje, agitador, medidor de nivel, medidor de pH, tanque, medidor de °Brix, salida de CO₂, entre otros elementos. En la Figura 1.9 se puede observar el diseño del reactor fermentador.

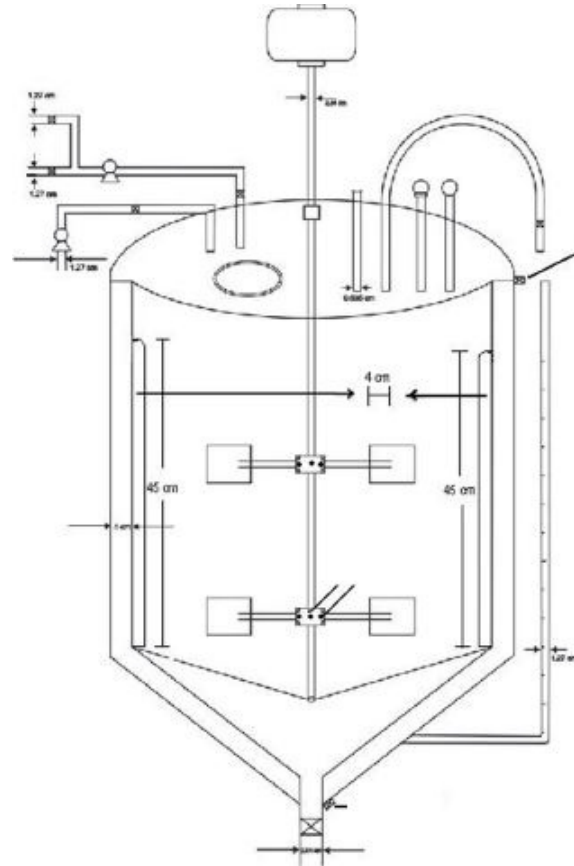


Figura 1.7: Vista frontal del diseño del reactor de fermentación [18]

En lo que respecta al reactor destilador, tiene una capacidad de 50 litros de solución para ser destilado, en donde la presión de diseño es de 28.03 lb/in^2 (psi). El condensador acoplado a este reactor tiene una longitud de 45 cm, con un diámetro de 4 in y cuenta con un serpentín interior de 3 in de diámetro, con una longitud de 40 cm y 1 cm de separación entre vuelta de cada espiral. De la misma manera, hace una descripción de los componentes principales: tapa del reactor, brida, válvulas, tanque, área de calentamiento y condensador. Ambos reactores están construidos de lamina T-304 calibre 16 in, todo en acero inoxidable.

reactor, así como las características de las reacciones químicas. En lo que respecta al diseño tiene una capacidad de 20 litros. Y el modelado, esta enfocado al control de la temperatura, características químicas de las reacciones y las características físicas de los parámetros que interviene en el sistema. Como resultado obtuvieron 15 g/L de concentración de etanol, en un tiempo de fermentación de 20 horas, alcanzando una temperatura de 47.6 °C. En la Figura 1.9 se muestran las mediciones de las variables realizadas en el proceso de fermentación.

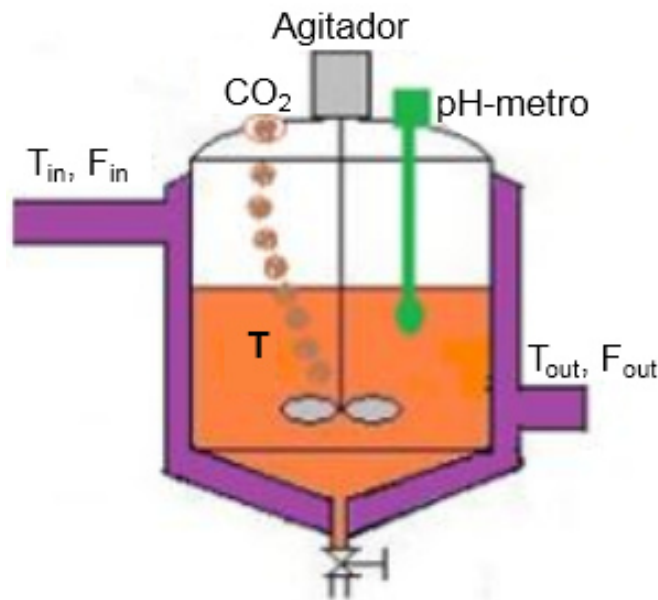


Figura 1.9: Medición de variables [19]

Qazizada *et al* 2016 [20] realizó un trabajo que aborda el diseño de un biorreactor tipo batch agitado por lotes para la producción de bioetanol con levaduras *saccharomyces cerevisiae* en condiciones anaerobias para mejorar el rendimiento del proceso de fermentación. El fermentador consta de un volumen de operación de 52.5 m³. La fermentación se realizó a una concentración de glucosa de 200 g/L, con un tiempo de 12 horas en agitación. Este porcentaje demostró que la concentración de azúcar en el biorreactor agitado por lotes se convirtió con éxito en etanol. La producción del biorreactor es de 6,323 kg por lote, llegando a producir 514 lotes por año.

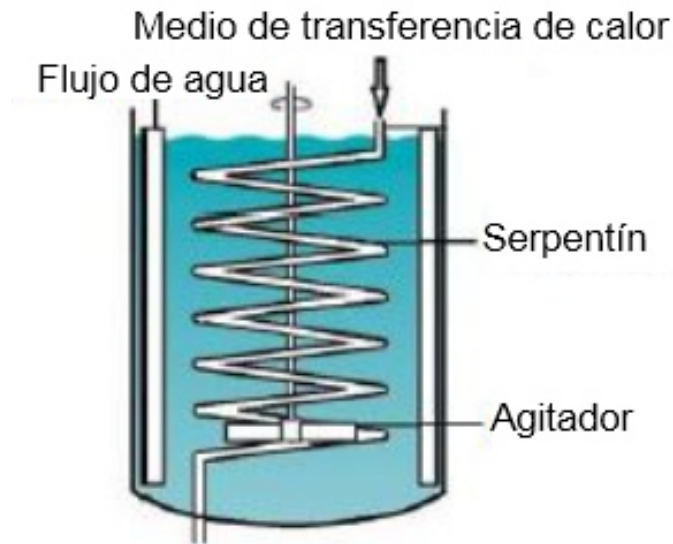


Figura 1.10: Serpentín helicoidal de un biorreactor tipo batch [20]

1.2.4 MEZCLAS GASOLINA-ETANOL

En las últimas décadas, se han publicado diferentes artículos, que investigan la influencia de las mezclas de etanol y gasolina en los motores de encendido provocado. Por otra parte, aun existe la necesidad de investigación adicional para comprender aun mejor la influencia de estas mezclas y sus propiedades fisicoquímicas [21]. Asimismo, el etanol puede aumentar la eficiencia del motor de encendido por chispa y al mismo tiempo reduce las emisiones de gases de escape. Por otra parte, la determinación del mejor uso de estas mezclas es, por lo tanto, un tema de creciente importancia.

Castillo *et al* 2012 [22], realizaron una investigación que aborda, el análisis de las propiedades fisicoquímicas de mezclas de gasolina con 5% y 10% de etanol anhidro. Como resultado muestra que el contenido de oxígeno aumenta considerablemente con la adición del etanol.

Otra propiedad que evaluaron fue el número de octano de investigación y número de octano del motor. El número de octano (NO) de una gasolina, refleja que tan

propenso es un combustible a causar problemas de "golpeteo" del motor (*knocking* por sus siglas en inglés). La causa de este problema es una autoignición prematura de la mezcla aire-combustible, lo cual afecta al avance del frente de llama dentro del cilindro del motor. Por último, el promedio del poder calorífico de las tres repeticiones de la gasolina premium fue de 44.5 MJ/kg, el de magna correspondió a un valor de 43.4 MJ/kg, mientras que el etanol es de 27 MJ/kg. Así el poder calorífico de las mezclas disminuye con la adición de etanol.

1.3 HIPÓTESIS

Con el desarrollo del sistema de fermentación y destilación acoplado al reactor híbrido tipo batch, se es capaz de producir bioetanol que cumpla con los requerimientos de calidad de los motores de combustión interna tipo gasolina.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Ampliar las capacidades y flexibilidad del reactor híbrido tipo batch para producir bioetanol para su utilización en motores de combustión interna.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Poner puesta a punto el reactor híbrido tipo batch para fermentación y destilación.
2. Establecer la metodología adecuada para el proceso de fermentación.
3. Realizar el proceso de fermentación a partir del jugo de naranja.
4. Realizar el proceso de destilación para la obtención del bioetanol.
5. Evaluar la calidad del bioetanol.
6. Determinar los niveles de presión máxima promedio en el cilindro del motor CFR para dos relaciones de compresión y tres temperaturas de trabajo.
7. Evaluar la duración de la primera fase de combustión usando mezclas gasolina-bioetanol en el motor CFR.
8. Determinar los valores de autoignición para las dos relaciones de compresión en las mezclas binarias como caso de estudio.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Por el presente capítulo se centrará en dar una descripción del contenido de la investigación a realizar. Se comienza explicando el motor de encendido provocado, así como el proceso de la combustión, el motor CFR de compresión variable. Modelo: F1/F2. Enseguida se describe el fruto de la naranja y por último se exponen los conceptos de biocombustibles (bioetanol).

2.0.1 MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO

Este motor tiene una característica fundamental, que el inicio de la combustión se produce mediante un aporte de energía externa, el cual se consigue al hacer saltar una chispa entre los dos electrodos de una bujía. El instante en el que se hace saltar la chispa, deberá ser el momento adecuado para conseguir que el proceso de combustión sea lo más eficiente posible. Por lo consiguiente, la mezcla de aire combustible en estos motores, se realiza fuera del cilindro durante el proceso de admisión formando una mezcla homogénea. Por lo consiguiente, también puede introducirse solamente aire durante el proceso de admisión y el combustible se inyecta después durante la compresión directamente al cilindro formando una mezcla heterogénea. Dicho lo anterior, el proceso de combustión se produce por avance de un frente de llama que recorre la cámara de combustión, partiendo desde la bujía y separando en todo momento dos zonas claramente determinadas, una con gases frescos y otra con gases quemados. A estos tipos de motores también se les conoce como: motor de explosión, motor de encendido por chispa y motor de Otto [13].

2.1 EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

La combustión es el proceso más importante que tiene lugar en los motores de ignición por chispa. Durante este proceso, una llama turbulenta, se propaga a través de la cámara de combustión y quema la mezcla de aire-combustible. Los motores de encendido provocado (MEP), tienen como característica fundamental el inicio de su combustión, el cual, se produce mediante un aporte de energía. Esto, al hacer saltar una chispa entre los dos electrodos de una bujía. En el instante que se hace saltar la chispa, es el adecuado para conseguir que el proceso de combustión sea lo mas eficiente posible.

La combustión de la mezcla aire/combustible hace que el pistón (8) Figura 2.1 realice un movimiento de vaivén en el cilindro (9). La biela (10) convierte el movimiento de giro del pistón en un movimiento de rotación del cigüeñal (11) que se mantiene mediante un volante en el extremo del cigüeñal.

Hoy en día, la mayoría de los motores de combustión interna, son del tipo de cuatro tiempos. El principio de cuatro tiempos emplea válvulas de intercambio de gases (5 y 6) para controlar el ciclo de escape y recarga. Estas válvulas abren y cierran los conductos de admisión y escape del cilindro, asimismo en el proceso controlan el suministro de aire/mezcla de combustible y la expulsión de los gases de escape quemados.

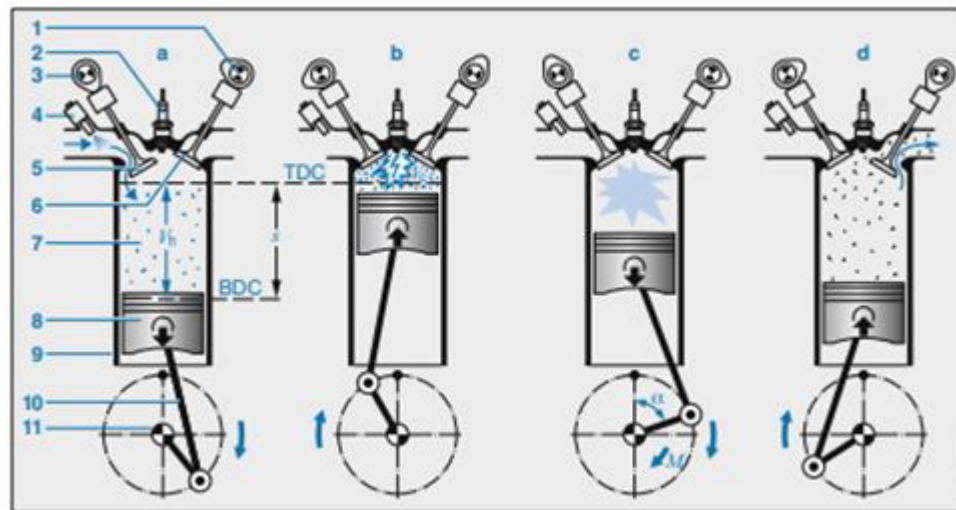


Figura 2.1: Ciclo de trabajo del motor de gasolina de 4 tiempos [23]

A continuación se describe cada uno de los cuatro tiempo de un motor de gasolina.

Admisión (a): Referido al Punto Muerto Superior (TDC), el pistón se mueve hacia abajo y aumenta el volumen de la cámara de combustión (7) para que el aire (inyección directa de gasolina) o la mezcla aire/combustible (inyección múltiple) ingrese a la cámara de combustión más allá de la válvula de admisión abierta (5). La cámara de combustión alcanza el volumen máximo en el Punto muerto inferior

(BDC).

Compresión (b): Las válvulas de intercambio de gases están cerradas, y el pistón se mueve hacia arriba en el cilindro. Al hacerlo, reduce el volumen de la cámara de combustión y comprime la mezcla de aire/combustible.

Combustión (c): Antes de que el pistón alcance el Punto Muerto Superior (TDC), la bujía (2) inicia la combustión de la mezcla de aire/combustible en un punto de ignición dado (ángulo de encendido). Esta forma de ignición se conoce como ignición suministrada externamente. El pistón ya ha pasado el TDC antes de que la mezcla se haya quemado por completo. Las válvulas de intercambio de gases permanecen cerradas y el calor de la combustión aumenta la presión en el cilindro hasta tal punto que el pistón se fuerza hacia abajo.

Escape (d): La válvula de escape (6) se abre poco antes del Punto Muerto Inferior (BDC). Los gases calientes de escape están bajo alta presión y salen del cilindro a través de la válvula de escape. El pistón se mueve hacia arriba expulsando los gases de escape restante [23].

2.2 EL MOTOR CFR DE COMPRESIÓN VARIABLE.

MODELO: F1/F2

La unidad de calificación combinada CFR F1/F2 de *Waukesha*, es el estándar aceptado a nivel mundial para determinar y certificar las características antidetonantes de los combustibles para motores. La unidad F1/F2 puede ejecutar tanto el método de investigación (RON), así como el método del motor (MON), con capacidades de prueba de 40 a 120 octanos. En la Figura 2.2 se muestra el motor de gasolina 2015.



Figura 2.2: Modelo F1/F2 de gasolina [24]

Para llevar a cabo la prueba es la misma en los dos métodos. Solo varía la velocidad de giro. El número de octanos de un combustible está definido por la norma ATSM D2699/D2700 IP 236/237 [15]. La prueba consiste variando la relación de compresión manipulando la altura del cilindro durante el funcionamiento del motor, esto produce varios niveles de intensidad de golpeteo, lo que hace posible comparar los combustibles desconocidos con combustibles de referencia con valores de octano conocidos [24].

Tabla 2.1: Características para los dos métodos estandarizados

	Método motor (RON)	Método Research (MON)
Revoluciones del motor	900 rpm	600 rpm
Relación de compresión	Variable	Variable
Punto de encendido	En función de la RC	17 grados antes del PMS
Pre calentamiento mezcla	149 °C	No
Pre calentamiento aire	38 °C	52 °C

2.3 NARANJA

2.3.1 ORIGEN

Los naranjos se originaron hace unos 20 millones de años en el sudeste asiático, desde entonces y hasta la fecha han sufrido numerosas modificaciones debidas a la selección natural y a la hibridaciones, tanto naturales como producidas por el hombre. La dispersión de este cítrico desde su lugar de origen se debe fundamentalmente a los grandes movimientos migratorios [25].

El naranjo es un árbol de tres a cinco metros de altura, con una copa redonda y ramas regulares. Sus hojas son perennes, medianas y alargadas, con bases alargadas y terminadas en la punta. Las flores aparecen en las axilas de las hojas, solitarias o en racimos. Existen algunas variedades de este fruto, las cuales han surgido como mutaciones estables. Estas mutaciones son frecuentes en cítricos y se estabilizan rápidamente. Numerosas mutaciones espontáneas han dado origen a diversas variedades de naranjas. Actualmente se consideran tres tipos, los cuales se describen a continuación [26]:

- **Navel:** Tiene frutos partenocárpicos de gran tamaño. Destacan las variedades: Navelate, Navelina, Newhall, Washington Navel, Lana Late y Thompson. Se caracterizan por tener buen vigor.
- **Blancas:** Dentro de esta variedad destacan la Salustiana y Valencia Late. Presentan frutos de buena calidad con pocas semillas, se caracterizan por ser árboles frondosos de tamaño medio y grande.
- **Sanguinas:** Esta variedad es muy productiva, en la que la fructificación predomina sobre el desarrollo vegetativo. Son variedades con brotaciones cortas, en esta destaca la variedad Sanguinelli.

2.3.2 TAXONOMÍA Y MORFOLOGÍA

Tabla 2.2: Taxonomía y morfología

Familia	Rutaceae
Género	Citrus
Especie	Citrus sinensis (L.) Osb.
Porte	Reducido 6-10 m. Tronco corto
Hoja	Limbo grande y espinas no muy acusadas
Flor	Ligeramente aromática, solas o agrupadas
Fruto	Hesperidio. Consta de: exocarpo (flavedo), mesocarpo (albedo) y endocarpio (pulpa y tricomas con jugo)

En la Figura 4.17 se muestran las partes del fruto de la naranja.

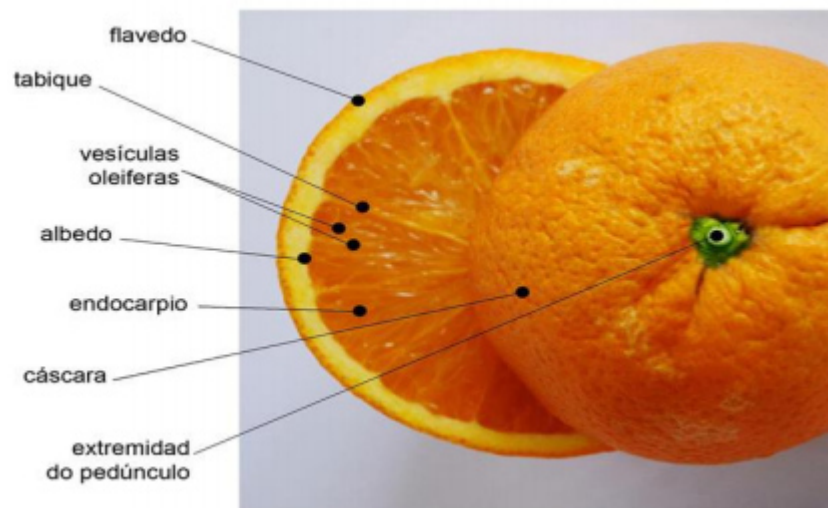


Figura 2.3: Partes del fruto de naranja. Fuente infoAgro [25]

2.4 BIOCOMBUSTIBLES

La evidencia científica confirma que el uso intensivo de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural producen emisiones de gas de efecto invernadero (GEI), la destrucción de los recursos naturales y la preocupación por la

inseguridad energética. Por otra parte, las fuentes de energías renovables, en específico los biocombustibles, ha despertado un gran interés por su producción y uso en ciertos países, ya que pueden satisfacer la demanda de energía baja en carbono y las preocupaciones de la seguridad energética, así como otros riesgos mencionados anteriormente [27].

A nivel mundial son diversas las fuentes que se han determinado como materia prima potencial, empleada para la producción de biocombustibles, las cuales son principalmente tres: cultivos agrícolas, cultivos forestales y residuos de cultivos [28], así como también de la porción biodegradable de desperdicios industriales y municipales [29].

Por consiguiente, el término biocombustible se refiere a los combustibles líquidos o gaseosos, producidos a partir de biomasa; en otras palabras, provienen de materia orgánica originada de un proceso biológico y físico-químico y que se pueden emplear como fuente directa o indirecta de energía.

Dicha energía puede emplearse para distintos fines: transporte, electricidad, calefacción, etc. [29, 30]. Dentro de los biocombustibles, los biocarburantes abarcan al subgrupo caracterizado por la posibilidad de su aplicación a los actuales motores de combustión interna (motores diésel y Otto). Actualmente se encuentran en desarrollo principalmente dos tipos de biocarburantes: el **biodiésel**, obtenido a partir de la transesterificación de aceites vegetales y grasas de animales con un alcohol ligero, y el **bioetanol**, obtenido fundamentalmente de semillas ricas en azúcares mediante fermentación. Por otra parte, hay que destacar el etil-tercbutil éter (**ETBE**) producido a partir del bioetanol, ya que su utilización en motores presenta menos problemas que el propio bioetanol [31].

De acuerdo con la U.S. Energy Information Administration (EIA), la biomasa es un material orgánico que proviene de plantas y animales, contiene y almacena la energía proveniente del sol. En el caso de las plantas, absorben la energía procedente del sol en un proceso llamado fotosíntesis [32] como se observa en la Figura 2.4.

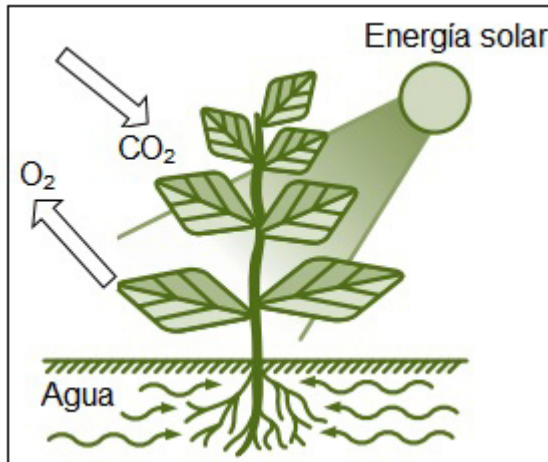
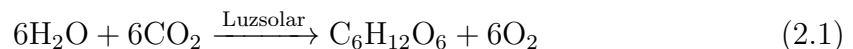


Figura 2.4: En el proceso de fotosíntesis, las plantas convierten la energía radiante del sol en energía química en forma de glucosa [32]

La producción de biomasa, como resultado de la reacción de la fotosíntesis, depende esencialmente de la energía solar, agua y dióxido de carbono (CO_2); tiene lugar en las células vegetales de los estomas de las hojas y se representa por la siguiente expresión, en donde el agua y dióxido de carbono se combinan para formar una molécula de glucosa (azúcar simple) y oxígeno.



En términos energéticos, esta reacción presenta la formación de 1 kg de azúcar, que corresponde a la fijación de cerca de 17.6 MJ (mega joules) de energía solar, equivalente a cerca de medio litro de gasolina. Por balance de masa de esta reacción, la síntesis de 1 kg de glucosa consume cerca de 0.6 Kg de agua y 1.4 kg de dióxido de carbono, liberando a la atmósfera 1 kg de oxígeno. Naturalmente, el agua sólo representa la parte utilizada en la composición del azúcar, puesto que durante su crecimiento y en particular durante la fotosíntesis se produce evapotranspiración y el vegetal necesita agua en volúmenes centenas de veces mayor que la cantidad fijada en el producto del vegetal. Por ello, la condición fundamental para producir biomasa y por ende, energía, es la disponibilidad de radiación solar, agua y dióxido de carbono

[33].

Por otra parte y con base a la (EIA), en los Estados Unidos, los biocombustibles de biomasa proporcionaron aproximadamente el 5 % de la energía primaria utilizada en el 2016. De este porcentaje, aproximadamente el 48 % era de biocombustibles (principalmente de etanol), el 41 % era de madera y biomasa derivada de la madera y por último el 11 % corresponde a la biomasa de basura municipal [32]. En la Figura 2.5 se ilustran diferentes fuentes de biomasa.

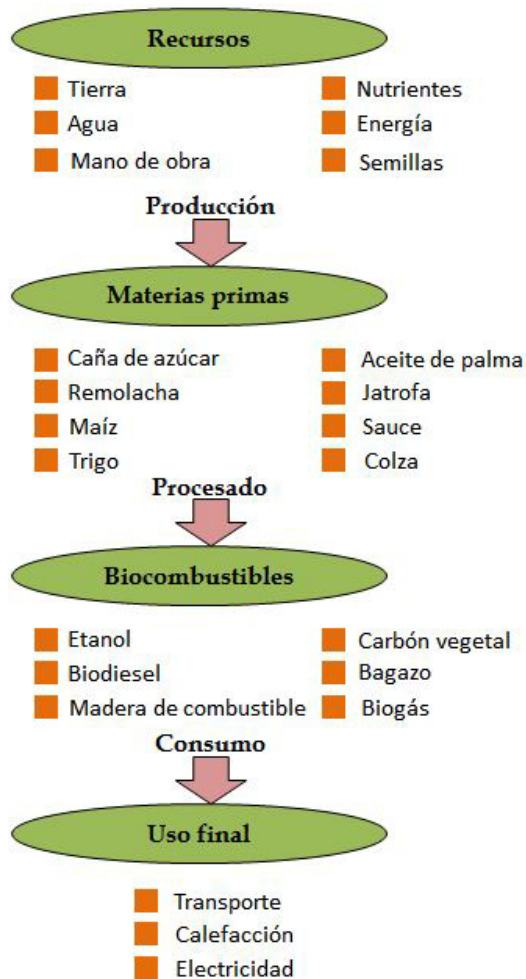


Figura 2.5: Biocombustibles: desde la materia prima hasta su uso final

Fuente: FAO, 2008 [34]

2.4.1 BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los biocombustibles líquidos, también denominados biocarburantes, los cuales son obtenidos mediante procesos químicos y biológicos. Los biocombustibles líquidos son, principalmente, el bioetanol y el biodiésel y son utilizados en el transporte y en la industria química [35].

Estos biocombustibles, son generalmente mezclados con combustibles derivados del petróleo (gasolina y diésel). El uso de bioetanol o biodiesel significa menos combustible fósil. En general estos compuestos tienen una combustión más limpia que los convencionales [36].

Con base en la producción de biocombustibles líquidos existe una clasificación popularizada, que generalmente se divide en tres categorías: primera, segunda y tercera generación, las cuales se describen más adelante. En general, la principal distinción entre ellos es la materia prima y la tecnología de conversión utilizadas para su producción [30, 35, 37, 38].

2.4.1.1 BIOCOMBUSTIBLES DE PRIMERA GENERACIÓN

Se producen a partir de cultivos dedicados a los bioenergéticos, es decir, la materia prima de los cultivos alimenticios. Están hechos principalmente de azúcar o almidón (en el caso del bioetanol) y cultivos de semillas oleaginosas (en el caso del biodiésel) [34, 37, 39]. Con base en la Organización Latinoamericana de Energía y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, estos biocombustibles ya son producidos y comercializados en cantidades significativas por diversos países, contribuyendo actualmente el 1.5% del total del combustible de transporte a nivel mundial. Sin embargo, generan algunas preocupaciones, principalmente en lo que se refiere al uso del suelo [30].

2.4.1.2 BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN

La segunda generación de biocombustibles incluye aquellos productos biológicos que provienen de materia prima no alimentaria, en otras palabras, provienen de la biomasa lignocelulosa como la contenida en paja de cereales, bagazo de caña de azúcar, hierba, tallos, raíces, madera, cáscaras, entre otras. Aunque este tipo de biocombustibles aun se encuentran en fase precomercial, se espera que sus procesos de producción sean viables en los próximos años [35, 37].

2.4.1.3 BIOCOMBUSTIBLES DE TERCERA GENERACIÓN

Los biocombustibles de tercera generación no comprometen el suministro de alimentos entre la población y se producen a partir de materias primas modificadas genéticamente, principalmente algas y otros microorganismos [30]. Las algas tienen un rendimiento de crecimiento muy distinto en comparación con la biomasa lignocelulosa clásica. Estos procesos aún se encuentran en fase de desarrollo muy lejos de su producción a gran escala y por tanto, de su comercialización, por lo que se espera que no alcance una gran producción a corto plazo [35, 37].

2.5 BIOETANOL

Alternativas a los combustibles derivados del petróleo son buscadas con el fin de reducir la dependencia de los recursos no renovables. El combustible renovable más prometedor hoy en día es el bioetanol, cuya única diferencia con otros tipos de etanol es que su procedencia es de la biomasa [40].

De acuerdo con la U.S. Energy Information Administration. El bioetanol es un alcohol incoloro de origen vegetal que se produce a partir de la fermentación y se obtiene de los azúcares que se encuentran en cultivos como maíz, sorgo, cebada,

caña de azúcar, remolacha azucarera, entre otros [36]. Estas especies se componen principalmente de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa [31].

Cualquiera que sea el origen del etanol (biomasa, procesos petroquímicos o carboquímicos), es un combustible que libera significativas cantidades de calor al quemarse. Sin embargo, este biocombustible presenta algunas diferencias importantes en relación a los combustibles convencionales derivados del petróleo.

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas del bioetanol como combustible vehicular.

2.5.1 VENTAJAS DEL BIOETANOL

- Una de las principales ventajas es la elevada concentración de oxígeno, que representa cerca del 35 % de la masa de etanol.
- Las características del etanol permiten una combustión más limpia y un mejor desempeño en los motores de gasolina (ciclo de Otto), lo que conlleva a la reducción de la emisiones contaminantes.
- En el caso del uso de etanol hidratado (5 % de agua), es necesario adaptar los motores para un funcionamiento adecuado, pero cuando se trata de mezclas gasolina-etanol con concentraciones del 10 % del alcohol, se pueden utilizar los motores convencionales a gasolina sin necesidad de ajustes.
- En los motores flexibles (flex-fuel vehicle - FFV), con gran penetración en el mercado brasileño, se utiliza mezclas con cualquier concentración de etanol.
- Alto número de octano, lo cual reduce las emisiones de monóxido de carbono.
- Contribuye a disminuir las importaciones de gasolina, por lo que se reduce el precio del petróleo.

- Se obtiene de materias primas y recursos renovables (caña de azúcar, sorgo, etc.) incluyendo los residuos lignocelulósicos [41, 42].

2.5.2 DESVENTAJAS DEL BIOETANOL

Al mismo tiempo se discuten hoy en día las siguientes desventajas:

- Su producción es más costosa que la obtención de gasolina.
- La gasolina mezclada con etanol conduce la electricidad y su presión de vapor de Reid (RVP) es más alta, lo que implica mayor volatilización y puede contribuir a la formación de ozono y de smog.
- El etanol, en función del contenido de agua, puede ser altamente corrosivo.
- En el caso del etanol producido por el sector azucarero, existe el riesgo de que en dependencia de la coyuntura del mercado interno y externo del azúcar, los ingenios azucareros puedan optar por la disminución de la producción de etanol cuando los precios del azúcar sean relativamente altos.
- Otro de los grandes temores de la implementación de un programa de oxigenación de la gasolina con etanol es la presión que puede generar sobre los precios de los alimentos relacionados con las materias primas para la producción de bioetanol.
- Considerando los impactos ambientales, se ha expresado cierta preocupación referente al uso del etanol en mezclas con gasolina, ya que pueden aumentar los niveles de aldehídos en comparación con la combustión de la gasolina convencional [42].

2.5.3 PROPIEDADES DEL BIOETANOL

El bioetanol también conocido como alcohol etílico o alcohol de grano tiene como fórmula química:



A continuación, en la Tabla 2.3, se muestran algunas propiedades y características del bioetanol.

Tabla 2.3: Propiedades fisicoquímicas y termodinámicas del bioetanol

Parámetros	Unidad	Bioetanol
Poder calorífico inferior	kJ/kg	28,225
Peso molecular	g/mol	46
Densidad	kg/L	0.792
Rango de ebullición	°C, 1 atm	78.17
Punto de inflamabilidad	°C	21.11
Octanaje RON (Research Octane Number)	-	102-130
Octanaje MON (Motor Octane Number)	-	89-96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	842-930
Relación aire/combustible estequiométrica	-	9
Presión de vapor	kPa	15-17
Temperatura de ignición	°C	550
Contenido de azufre	% en peso	0
Solubilidad en agua	% en volumen	100
Grado alcohólico	% en volumen	99.5-95

Este combustible contiene 35% de oxígeno, lo que significa la reducción de partículas, monóxido de carbono y otras emisiones contaminantes. Con base en las

propiedades de la tabla anterior se puede demostrar que es posible una mayor relación de compresión y una combustión de menor tiempo, lo que conlleva a ventajas de eficiencia teóricas sobre la gasolina en motores de combustión interna (MCI). Esto es debido a que el número de octano es mayor (107), ya que mientras más elevado sea este, se tiene mejor proceso de combustión en estos tipos de motores. Un combustible de compuestos oxigenados como lo es el bioetanol, proporciona un valor antidetonante razonable, sin embargo tiende a incrementar las emisiones de óxidos de nitrógeno [6].

Como se ha venido describiendo, el bioetanol como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa, se puede utilizar de dos maneras básicamente: 1) en mezclas de gasolina y etanol anhídrido, 2) en etanol puro, generalmente hidratado. En la Tabla 2.4 se comparan las principales características del etanol y la gasolina.

Tabla 2.4: Propiedades de la gasolina y del etanol hidratado

Parámetro	Unidad	Gasolina	Etanol
PCI	kJ/kg	43.5	28.23
	kJ/L	32.18	22.35
Densidad	kJ/L	0.72-0.78	0.79
RON	-	90-100	102-130
MON	-	80-92	89-96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	330-400	842-930
Mezcla estequiométrica		14.5	9.0
Presión de vapor	kPa	40-65	15-17
Temperatura de ignición	°C	220	420
Solubilidad en agua	% en volumen	~ 0	100

De acuerdo a la Tabla 2.4 el etanol hidratado puro debe ser usado en motores fabricados o adaptados específicamente para este fin, en particular adaptando índices de compresión más elevados con el fin de utilizar adecuadamente el octanaje más

alto del etanol frente a la gasolina y así obtener ganancias de eficiencia del 10%. En otras palabras, el mayor octanaje del etanol permite que los motores obtengan más energía útil del calor del combustible, comparativamente con la gasolina. Así como este cambio hay otros que son efectuados en el sistema de alimentación de combustible y en la ignición, entre otros [33].

2.5.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

En el proceso de producción de bioetanol se obtiene el alcohol hidratado con un contenido aproximado del 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible [31].

En la Figura 2.6 se pueden ver de forma esquemática, las distintas etapas involucradas en el proceso completo de conversión de la biomasa en alcohol anhidro (etanol).

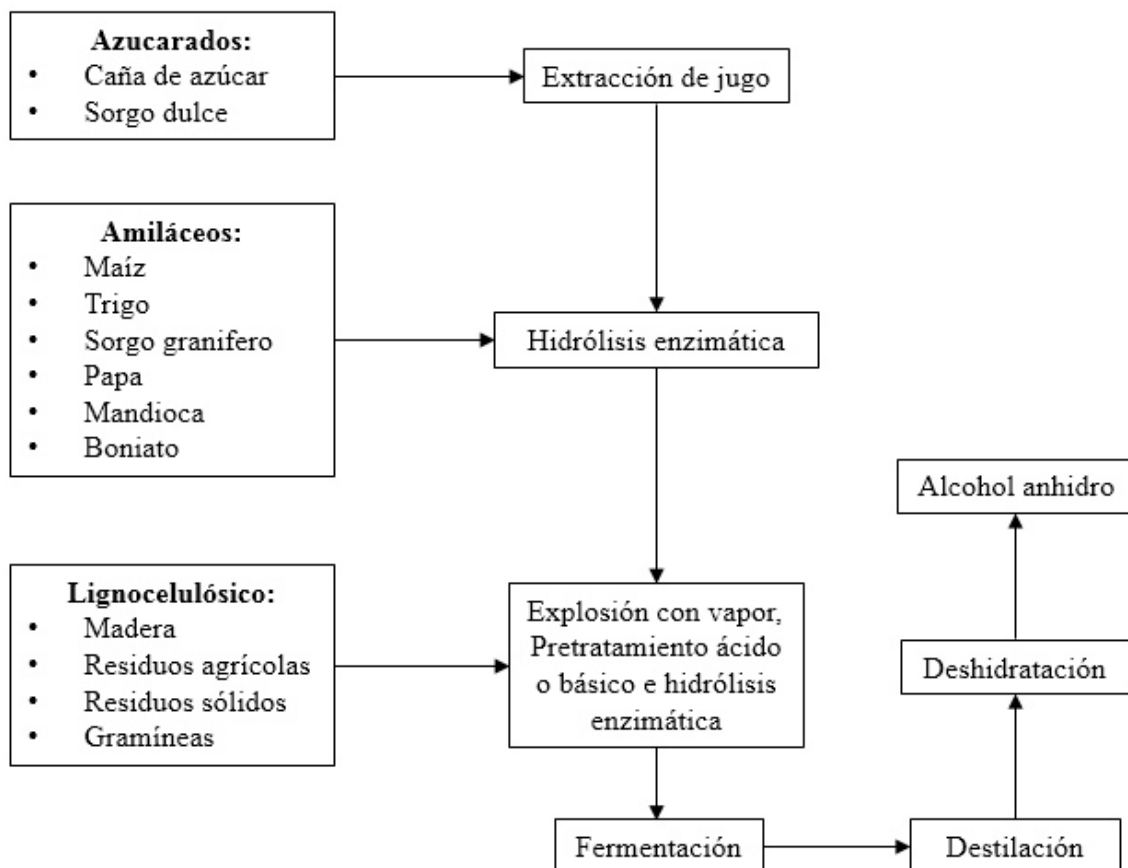


Figura 2.6: Proceso de conversión de biomasa a etanol [43]

Para la selección de materia prima a utilizar en la producción de bioetanol deben tenerse en cuenta los siguientes criterios [44]:

- Uso de cultivos que no compitan con alimentos.
- Modelos productivos de integración, no de sustitución.
- Uso de cultivos con arado, bajo uso de fertilizantes, mínimo uso de agua y baja erosión de suelo.
- Cultivos de crecimiento rápido y alta productividad.
- Procesos industriales flexibles para el procesamiento de diversas materias primas.

- Alto rendimiento de transformación, es decir, el uso de enzimas con alta actividad y mejores microorganismos fermentadores.
- Bajo uso de energía no renovable en el proceso.

En la Tabla 2.5 se compara la producción potencial de etanol de varios cultivos.

Tabla 2.5: Diferentes materias primas para la producción de bioetanol y su producción potencial

Materia prima	Producción potencial de bioetanol (L/ton)
Caña de azúcar	70
Remolacha azucarera	110
Boniato	125
Papa	110
Mandioca	180
Maíz	360
Arroz	430
Cebada	250
Trigo	340
Sorgo dulce	60
Bagazo y biomasa celulósica	280

2.5.5 FERMENTACIÓN

La fermentación alcohólica es un proceso ampliamente utilizado por el hombre desde hace décadas para la producción de bebidas alcohólicas. Cuando la fermentación se emplea en proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, los azúcares liberados durante la hidrólisis enzimática son fermentados con la siguiente producción de bioetanol y CO₂. La conversión estequiométrica de la glucosa y xilosa a etanol es de 0.51 gramos de bioetanol por gramo de azúcar. Por

lo consiguiente, en la práctica es muy difícil obtener conversiones tan elevadas, ya que las levaduras derivan en cierta parte de la energía que consumen para su metabolismo celular y crecimiento. El microorganismo comúnmente empleado a nivel industrial en los procesos de fermentación alcohólica es la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, ya que puede usar todo tipo de hexosas y produce altos rendimientos cercanos al máximo teórico (0.51) gramos de bioetanol/gramo de azúcar [45].

2.5.5.1 TIPOS DE FERMENTACIÓN

Para diseñar un fermentador se debe de tener en cuenta el tipo de fermentación que se va a realizar [46]. A continuación se describen algunos de los tipos de fermentación que existen:

Fermentación discontinua (batch)

Una fermentación discontinua (en batch), es un "sistema cerrado". Al inicio de la operación se añade la solución esterilizada de nutrientes y se inocula con el microorganismo, permitiendo que se lleve a cabo la incubación en condiciones óptimas de fermentación. A lo largo de este proceso no se añade nada, excepto ácidos o bases para controlar el pH.

Fermentación alimentada (fed-batch)

De la misma manera que la discontinua, pero algunos sustratos se añaden escalonadamente a medida que progresa la fermentación.

Fermentación continua

En esta fermentación, se establece un sistema abierto. La solución nutritiva estéril se añade continuamente al biorreactor; y una cantidad equivalente de solución utilizada en los nutrientes, con los microorganismos, se saca simultáneamente del sistema.

Reactores de enzimas

Es un sistema de producción continuo. Consiste en pasar el medio fresco a través de un biorreactor, en el que por diversas técnicas se inmovilizan las células (enzimas).

2.5.5.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN

■ Levadura

El cultivo que se desea realizar es de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, la cual es una de las más utilizadas en diversos procesos: industria alimenticia, fermentaciones de vino, entre otros. Este microorganismo es mesófilo, por lo que crece a una temperatura entre 30 y 40 °C, siendo la temperatura óptima de crecimiento de 32 °C aproximadamente [47].

Comportamiento de la levadura durante la fermentación

Para conocer el comportamiento de la levadura durante el proceso de fermentación, se conoce por medio de una curva de crecimiento la cual consta de cuatro fases Figura 2.7 [48].

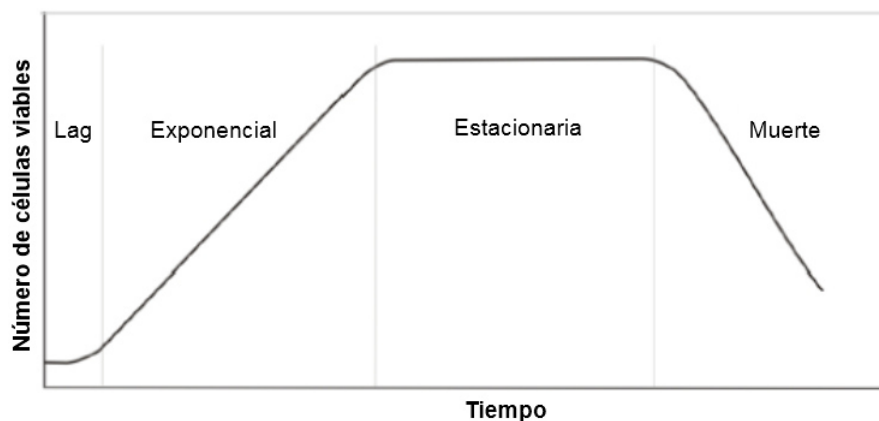


Figura 2.7: Curva de crecimiento de la levadura en sus diferentes fases [18]

1. Fase lag: en esta etapa no hay división celular de los microorganismos,

las células adaptan su metabolismo a las nuevas condiciones ambientales, para poder iniciar el crecimiento.

2. Fase exponencial: se da una formación de nuevas células siguiendo una ley exponencial. En ella la velocidad de crecimiento es máxima y el tiempo de generación es mínimo. Durante este medio los microorganismos consumen los nutrientes del medio a velocidad máxima.
3. Fase estacionaria: en esta fase no se incrementa el número de microorganismos a causa de motivos como: agotamiento de nutrientes y productos de reacción sean tóxicos para dicho microorganismos en concentraciones elevadas.
4. Fase de muerte: en esta última etapa se genera una reducción del número de microorganismos viables de la fermentación.

- **% SST**

Son sólidos solubles totales (SST) y la unidad de medida son los °Brix [18]. El mosto para fermentación alcohólica debe tener entre 16 y 20 °Brix, puesto que si este es muy bajo, el grado alcohólico obtenido será pobre; por el contrario si el valor de los °Brix es muy alto la fermentación no se efectúa; esto debido a que la presión osmótica que se ejerce sobre las levaduras es relativamente grande y no permite que actúen sobre los azúcares [46].

- **pH**

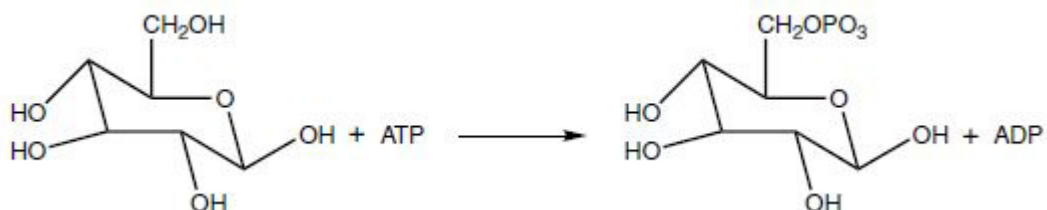
La levadura trabaja en medios relativamente ácidos, por lo que el pH debe mantenerse entre 3.4 y 3.5. Por otra parte, Santis [18] menciona que las levaduras se desarrollan en un pH entre 4.5 y 5. Durante el crecimiento en un reactor de fermentación, los metabolitos celulares son liberados al medio, lo que ocasiona un cambio en el pH del medio de cultivo. Por lo tanto, se debe controlar añadiendo un ácido o base según sea el caso.

- **Temperatura**

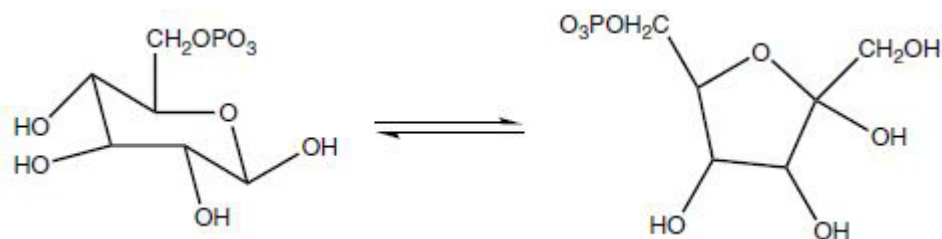
La temperatura durante la fermentación debe controlarse, debido a que durante la misma se produce un relativo aumento de esta, pues la descomposición de los azúcares producen una reacción exotérmica, es decir, con desprendimiento de calor. La temperatura óptima para la fermentación oscila entre 24 y 32 °C [46].

2.5.5.3 QUÍMICA DE LA FERMENTACIÓN

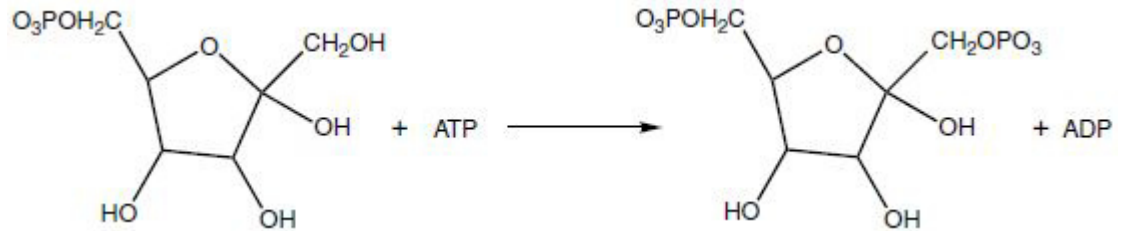
La fermentación de azúcares, en específico la de la glucosa, produce etanol. La fermentación se da con la hidrólisis catalizada por enzimas de un polisacárido a glucosa. Los almidones tienden a ser más fáciles de hidrolizar que la celulosa, es por esto que los almidones son la materia prima preferida para la producción de bioetanol. Dicho proceso inicia con la fosforilación de la glucosa por reacciones catalizadas por enzimas con ATP, produciendo α -glucosa 6-fosfato [49]:



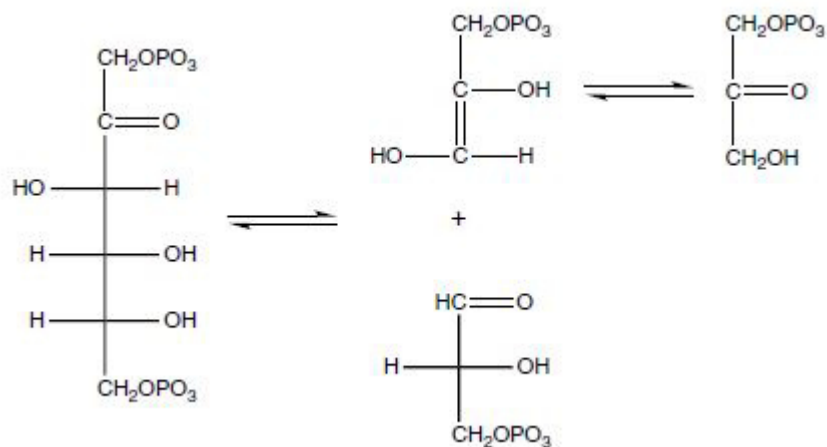
Enseguida la α -glucosa-6-fosfato se isomeriza a fructosa 6-fosfato, convirtiendo una aldohexosa a una cetoheptosa. La isomerización de la α -glucosa 6-fosfato a fructosa 6-fosfato procede como:



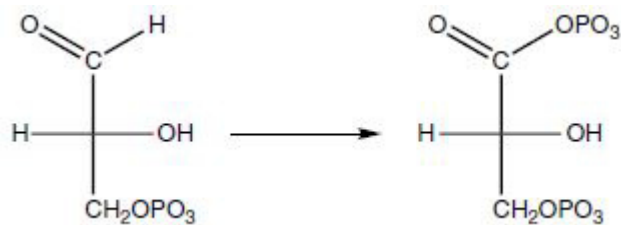
A continuación, ocurre una segunda fosforilación catalizada por la enzima fosfofructoquinasa, la cual convierte a la fructosa 6-fosfato a 1,6-bifosfato, mediante reacción con ATP:



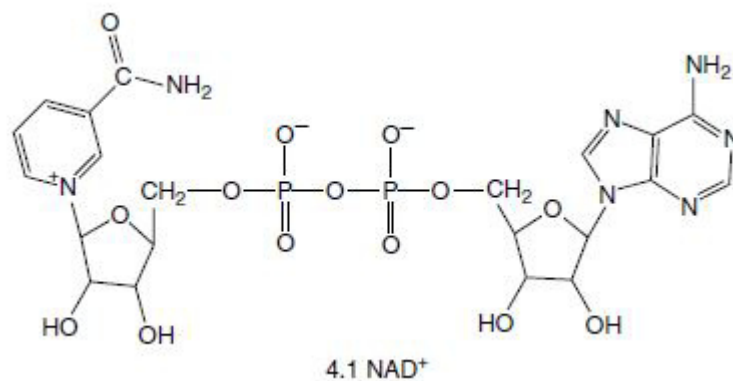
Enseguida, la fructosa 1,6-bifosfato se divide en dos moléculas de gliceraldehído-3-fosfato, uno de los cuales se isomeriza en fosfato de dihidroxiacetona:



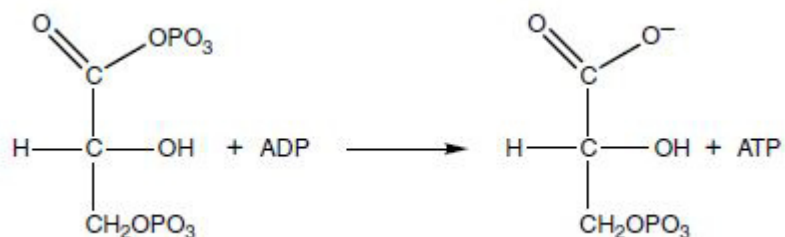
Por lo tanto, la molécula de gliceraldehído-3-fosfato se oxida de aldehído a ácido y se fosforila para producir 1,3-bisfosfoglicerato:



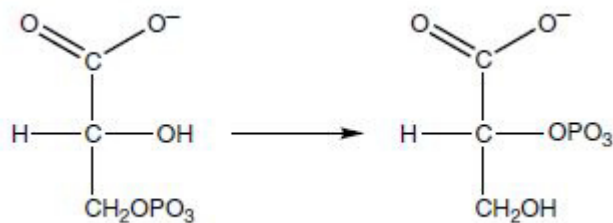
En este paso, se mezcla la coenzima nicotinamida adenina dinucleótido NAD^+ .



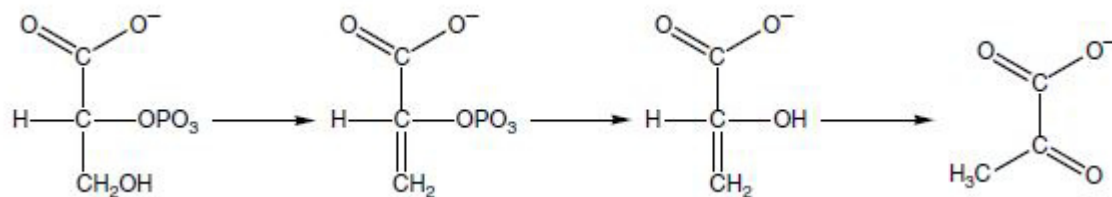
El NAD^+ realiza la función de portador de electrones (agente oxidante), en otras palabras, es un aceptador de electrones, siendo el NADH el agente reductor correspondiente, el cual dona electrones. El 1, 3-Bisfosfoglicerato transfiere un fosfato al ADP, regenerando al ATP.



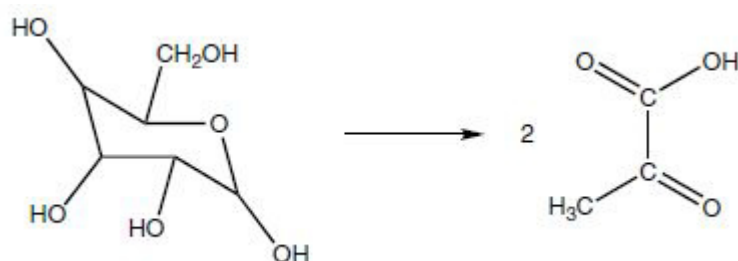
Dicho esto, se forma 3-fosfoglicerato, que se isomeriza en 2-fosfoglicerato:



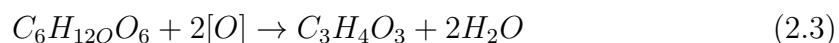
Posteriormente el 2-fosfoglicerato se convierte en piruvato (ácido pirúvico):



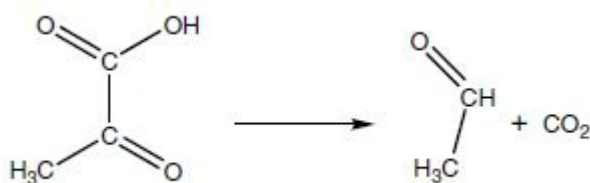
Finalmente, el proceso general convierte una molécula de glucosa en dos moléculas de ácido pirúvico:



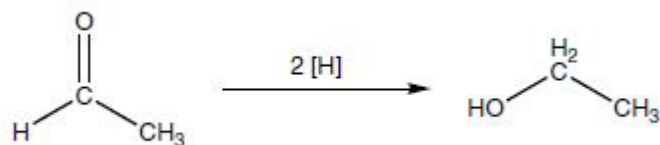
La conversión de glucosa en piruvato se llama glucólisis, en otros términos, una molécula de $C_6H_{12}O_6$ en dos moléculas de $C_3H_4O_3$. Debido que el producto total, es deficiente en hidrógeno con relación al material de partida, esta conversión debe ser una reacción de oxidación.



Una vez formado el ácido pirúvico, las enzimas catalizan la conversión del ácido pirúvico en etanol, particularmente aquellas enzimas que se producen en la levadura. Estos hongos tienen un papel importante en la fermentación y pertenecen a la especie *Saccharomyces*.



Por último, el ácido pirúvico tiene dos grupos funcionales: carboxilo y carbonilo. Los α -cetoácidos se descarboxilan sencillamente, formando dióxido de carbono y un aldehído que contiene un átomo de carbono menos que el ácido original y finalmente, el acetaldehído se reduce a etanol:



2.5.6 DESTILACIÓN

La destilación es un proceso que consiste en separar los distintos componentes de una mezcla aprovechando las diferencias de sus puntos de ebullición. Para ello se calienta una sustancia, normalmente en estado líquido, para que sus componentes más volátiles pasen a estado de vapor y a continuación volver esos componentes al estado líquido mediante su condensación [50].

2.5.6.1 TIPOS DE DESTILACIÓN

Destilación simple

También conocida como destilación sencilla. Aquí los vapores son llevados hacia un condensador para conseguir el cambio de fase. Este método se usa para la separación de líquidos con punto de ebullición inferior a 150 °C a presión atmosférica, o bien, para separar mezclas de líquidos miscibles que difieran en su punto de ebullición menos de 25 °C.

Destilación fraccionada

Este proceso, conocido también como rectificación, se utiliza en la separación de

sustancias cuyos puntos de ebullición difieren entre si menos de 25 °C. La diferencia con la destilación simple es que incorpora una columna de fraccionamiento entre la disolución y el refrigerante. La columna de fraccionamiento consta de un tubo largo de vidrio que lleva en su interior unas hélices de vidrio o platos de condensación. La columna aporta una gran superficie para el intercambio entre el vapor que sube y el condensado que desciende, lo que hace posible una serie de vaporizaciones y condensaciones a lo largo de la columna.

Destilación por arrastre de vapor

Es una técnica de destilación muy útil para sustancias de punto de ebullición muy superior a 100 °C y que se descomponen antes de alcanzar la temperatura de su punto de ebullición. La condensación de los vapores produce una mezcla acuosa a partir de la cual se extrae el compuesto deseado por filtración o extracción [51].

Destilación al vacío

Un líquido entra en ebullición cuando al calentarlo su presión de vapor se iguala a la presión atmosférica. En una destilación a vacío la presión en el interior del equipo se hace menor a la atmosférica con el objeto de que los componentes de la mezcla a separar se destilen a una temperatura inferior a su punto de ebullición normal.

Destilación molecular centrífuga

Este método consiste, en una columna larga que contiene una mezcla de gases que se cierra herméticamente y se coloca en posición vertical. Por lo anterior, se produce una separación parcial de los gases como resultado de la gravedad. Esta técnica, tiene una alta utilización en la industria química, procesamiento de alimentos, productos farmacéuticos e industrias del petróleo.

Destilación destructiva

Cuando se calienta una sustancia a una temperatura elevada, esta se descompone en varios productos, los cuales se separan por fraccionamiento en la misma

operación. Las aplicaciones más importantes de este proceso son la destilación destructiva del carbón para el coque, el alquitrán, el gas ciudad y el amoníaco, y la destilación destructiva de la madera para el carbón de leña, el ácido etanoico, la propanona y el metanol.

Destilación azeotrópica

Es una mezcla líquida de dos o más componentes, los cuales poseen una temperatura de ebullición constante y fija. Esta mezcla se forma debido a que al pasar al estado de vapor se comporta como un líquido puro, en otras palabras como si fuese un solo componente.

Destilación extractiva

Esta técnica es utilizada para separar mezclas binarias azeotrópicas. En esta operación se adiciona un tercer componente también conocido como agente de separación o solvente, el cual se caracteriza por ser no volátil, miscible, de alto punto de ebullición y no forma azeótropos adicionales.

Destilación por membrana

Este método está basado en un flujo a contracorriente de un fluido a diferentes temperaturas. La corriente de entrada de agua fría fluye a través de un condensador de paredes no permeables. Este sistema trabaja con un par de tubos, un condensador y un evaporador.

Destilación por batch

También conocida como destilación por lotes. Se carga al equipo una determinada cantidad de la mezcla a destilar, para que durante la operación uno o más compuestos se vayan separando de la mezcla original.

Destilación reactiva

Consiste en la transformación química mediante una o más reacciones, con la

separación de los componentes a contracorriente que resulta de esta. Además, este tipo de sistema permite, el rompimiento de azeótropos, incrementar la conversión de algunos sistemas reactivos, así como la reducción de costos de inversión y operación al llevar a cabo dos operaciones en un mismo equipo [50].

CAPÍTULO 3

HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan las herramientas experimentales que se utilizan en la realización de este proyecto. Como primer punto, se describe el método de destilación a presión atmosférica con la ayuda de las normas ASTM D86-04 y ASTM D1298-99, respectivamente. En segundo lugar, se detalla el método de la determinación del poder calorífico, con base a la norma ASTM-D240. Como tercer punto, se explica el método de obtención de gravedad específica con la ayuda de la norma ASTM D1298-99. Después, se explica el método de análisis por cromatografía de gases acoplado a masas. Por último, se describe la instalación experimental integrada por un motor monocilíndrico de compresión variable tipo CFR.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo del reactor híbrido tipo batch que se utilizó en esta investigación para la producción de bioetanol, el cual se detalla más adelante.

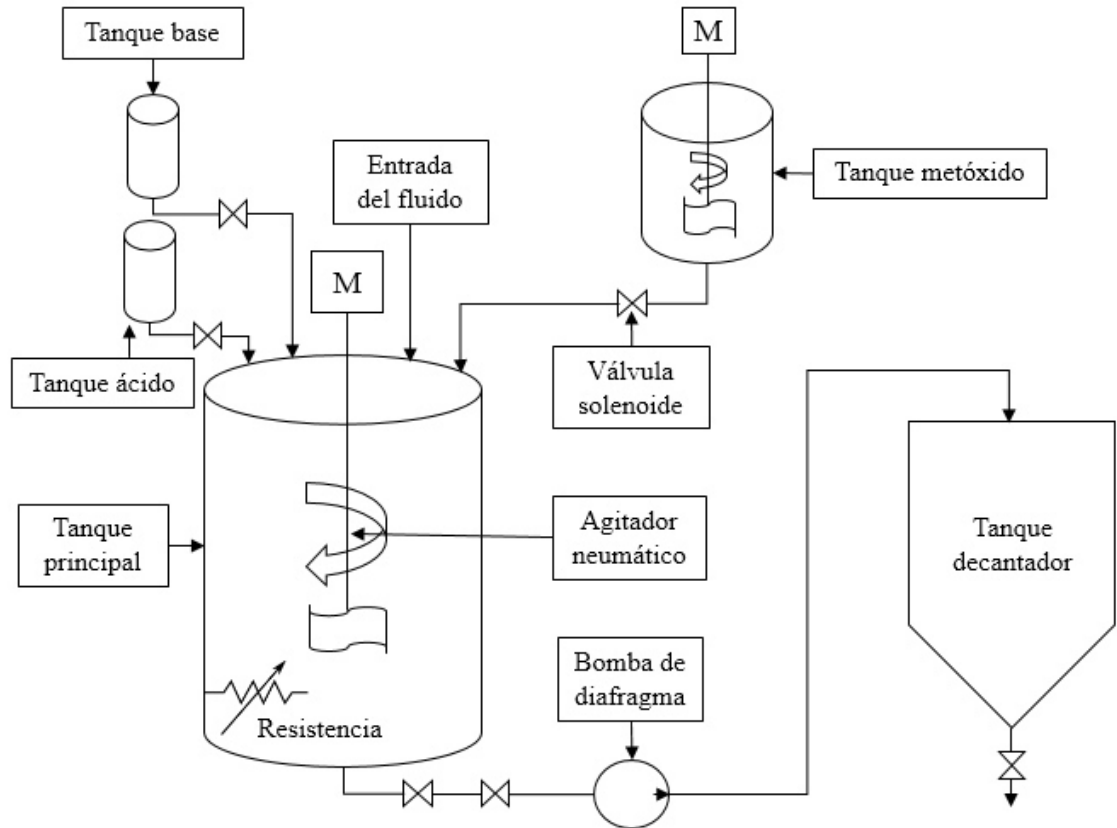


Figura 3.1: Diagrama de flujo del reactor híbrido tipo batch para la producción de bioetanol

A continuación se describirán los métodos estandarizados que se tomaron en cuenta para la experimentación de este proyecto.

3.1 MÉTODO DE DESTILACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La norma ASTM D86-04 [52], *Método de prueba estándar para la destilación de productos del petróleo a presión atmosférica* habla sobre los lineamientos a seguir para la obtención de resultados confiables en este tipo de destilaciones. Este método cubre la destilación atmosférica de productos petrolíferos y combustibles líquidos utilizando una unidad de laboratorio de destilación para determinar cuantitativamente las características de rangos de ebullición de combustibles, tales como gasolinas puras, destilados medios y livianos, combustibles para turbinas de aviación, diésel, biodiésel con una mezcla mayor al 20 %, combustibles marítimos, solventes especiales de petróleo y naftas.

El método consta de un matraz de destilación engler de 100 mL (1), un condensador recto de 70 cm de largo (2), un termómetro de mercurio con un rango de temperatura de 0 a 410 °C (3), una probeta de 100 mL (4), una mantilla con un rango de temperatura de 0 a 450 °C (5) y equipos auxiliares como: soporte universal, manguera de látex, bomba de recirculación con flujo controlable y tapón de corcho. Figura 3.5.

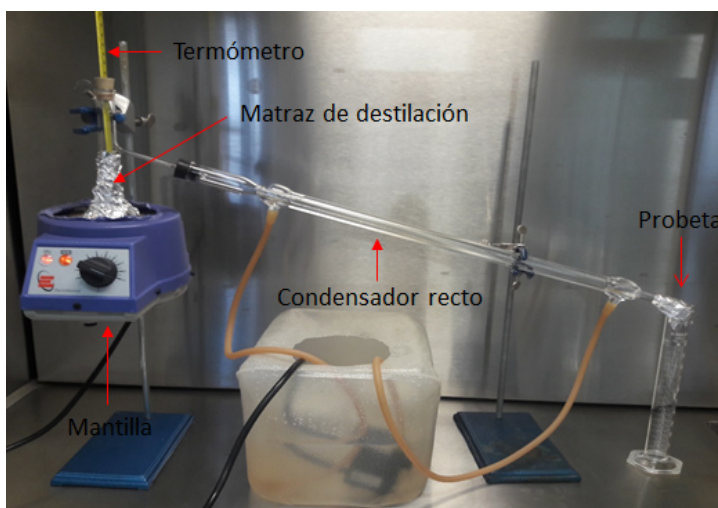


Figura 3.2: Equipo de destilación a nivel laboratorio a presión atmosférica

La prueba consiste en tomar 100 mL de la muestra a destilar y verterla en el matraz engler, al cual se le inserta un tapón de corcho en la parte superior, donde se coloca el termómetro, el cual debe estar centrado en el cuello de la matraz y alineado a una distancia del cuello de la salida del vapor. Enseguida se calienta con la mantilla eléctrica y cuando la muestra alcanza su temperatura de ebullición, comienza la producción de vapor, condensándose parte del mismo en el termómetro y en la paredes del matraz. La mayor parte del vapor pasa al refrigerante, donde se condensa debido a la corriente de agua fría que circula en la camisa de este; y el destilado (vapor condensado) escurre a la probeta colector a través de la alargadera del condensador.

3.2 MÉTODO DE DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

La norma ASTM D-240 [53], *Método de prueba estándar para determinación del calor de combustión de hidrocarburos combustibles líquidos mediante calorímetro de bomba* consiste en la combustión de una cantidad conocida de combustible en atmósfera de oxígeno, dentro de una bomba calorimétrica y en condiciones adiabáticas normalizadas. Lo siguiente es obtener el valor del PCI, que se calcula a partir del incremento de la temperatura del agua del vaso calorimétrico, del equivalente calorífico del calorímetro y de la aplicación de las correcciones termoquímicas.

3.2.1 BOMBA CALORIMÉTRICA

Es un dispositivo utilizado para determinar el poder calorífico de un combustible cuando este se quema a volumen constante. En este volumen se agrega el combustible analizar y la cantidad de oxígeno necesario para que ocurra la combustión; esta inicia mediante la ignición de un conductor eléctrico en corto circuito, para

que se produzca la liberación de calor.

Los componentes para la determinación del PCI de la norma ASTM D-240 se muestran en la Figura 3.3 y constan de: 1) un termómetro con rangos de medición de 0 a 410 °C, en él se mide la elevación de la temperatura del combustible debida al calor liberado, 2) un lente óptico para visualizar el valor de la temperatura, 3) una varilla de soporte para el termómetro, 4) una tapa; este componente sujeta el termómetro y el agitador, 5) una banda elástica: tiene como función conectar la parte superior del agitador con la flecha del motor, 6) un motor, 7) un agitador, 8) una tina, la cual se llena con 2000 g de agua destilada y se introduce en la coraza del calorimétero, 9) un recipiente adiabático: es el componente que contiene a la bomba calorimétrica, junto con la tina y en la parte superior se ajusta con la tapa, 10) dos electrodos: tienen como función conectarse al cabezal de la bomba para llevar a cabo el quemado del combustible, 11) y por último la bomba calorimétrica; en este artefacto se lleva a cabo la explosión del combustible [53].

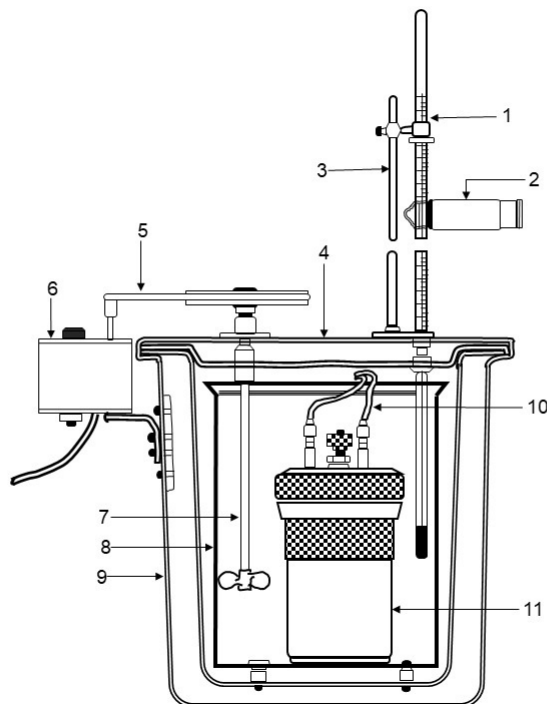


Figura 3.3: Componentes principales que conforman el calorimétero

El método consiste en 1) llenar la tina con 2 kg (2000 g) de agua destilada, 2) cortar 10 cm de alambre fusible, 3) pesar el crisol dentro de la pesa gravimétrica, 4), pesar 1 g de la muestra en el crisol, 5) colocar el crisol con la muestra y el alambre fusible en el cabezal de la bomba, el alambre fusible debe tocar la muestra pero no a la superficie del crisol ya que esto podría provocar un corto circuito, 6) insertar el cabezal ya con la muestra dentro del cilindro de la bomba calorimétrica y asegurarlo, 7) presurizar la bomba a 3000 kPa ó aproximadamente 450 psi (30 atm) de presión, 8) sumergir la bomba dentro de la tina y conectar los electrodos a las terminales de la bomba, 9) colocar la tapa del calorímetro sobre la coraza con la bomba dentro de ella, 10) unir el agitador con el motor por medio de una banda elástica, 11) posteriormente la prueba se monitorea tomando la lectura de la temperatura en un lapso de 17 minutos, se toma la temperatura inicial, ese este momento se empieza la prueba, se pone en marcha el motor y paralelamente se inicia el tiempo en el cronómetro, desde el tiempo cero hasta el minuto 6, cuando ocurre la combustión presionando un botón de ignición que posee la bomba. Transcurrido este tiempo las mediciones de las temperaturas se realizan cada 15 segundos hasta el minuto 9. Después de este tiempo las lecturas se realizan cada 30 segundos hasta el minuto 11. Después nuevamente las lecturas se toman a cada minuto hasta terminar la prueba al minuto (17). Ya terminada la prueba se hace una titulación agregando dos succiones de naranja de metilo a los residuos hasta que estos queden neutralizados. Por último, se obtiene el valor del poder calorífico mediante la siguiente ecuación:

$$Hg = \left(\frac{tw - e1 - e2 - e3}{m} \right) \quad (3.1)$$

donde:

- Hg = es el poder calorífico [MJ/kg].
- t = es el incremento de la temperatura corregida [°C].
- W = es la energía equivalente del calorímetro [MJ/°C].

- e_1 , e_2 y e_3 = son correcciones de la formación de ácido nítrico (HNO_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y para el calor de formación del cable fusible respectivamente [cal].
- m = masa del combustible [g].

El incremento de la temperatura del calorímetro se determina a partir de la ecuación 3.2:

$$t = t_c - t_a - [r_1 \cdot (b - a)] - [r_2 \cdot (c - b)] \quad (3.2)$$

donde:

- t = incremento de la temperatura corregida [$^{\circ}\text{C}$].
- a = tiempo de disparo [min].
- b = tiempo cuando el aumento de la temperatura alcanza el 60 % del total [min].
- c = tiempo al comienzo de la prueba, en el cual la temperatura con el tiempo permanece constante [min].
- t_a = temperatura al momento del disparo corregida por el error del termómetro [$^{\circ}\text{C}$].
- t_c = temperatura en el tiempo c corregido por el error del termómetro [$^{\circ}\text{C}$].
- r_1 = rango de incremento de temperatura por minuto, durante los primeros 5 minutos antes del disparo [$^{\circ}\text{C}$].
- r_2 = rango de temperatura por minuto, después de 5 minutos del tiempo c , si la temperatura disminuye, r_2 es negativo y la cantidad $-r_2 (c-b)$ es positiva [$^{\circ}\text{C}$].

La energía equivalente del calorímetro se determina mediante la ecuación 3.3:

$$W = \frac{H \cdot m + e1 + e3}{t} \quad (3.3)$$

donde:

- H = es el calor de combustión del ácido benzoico estándar MJ/g] [54].

En la Figura 3.4, se muestra la curva de liberación de calor del etanol.

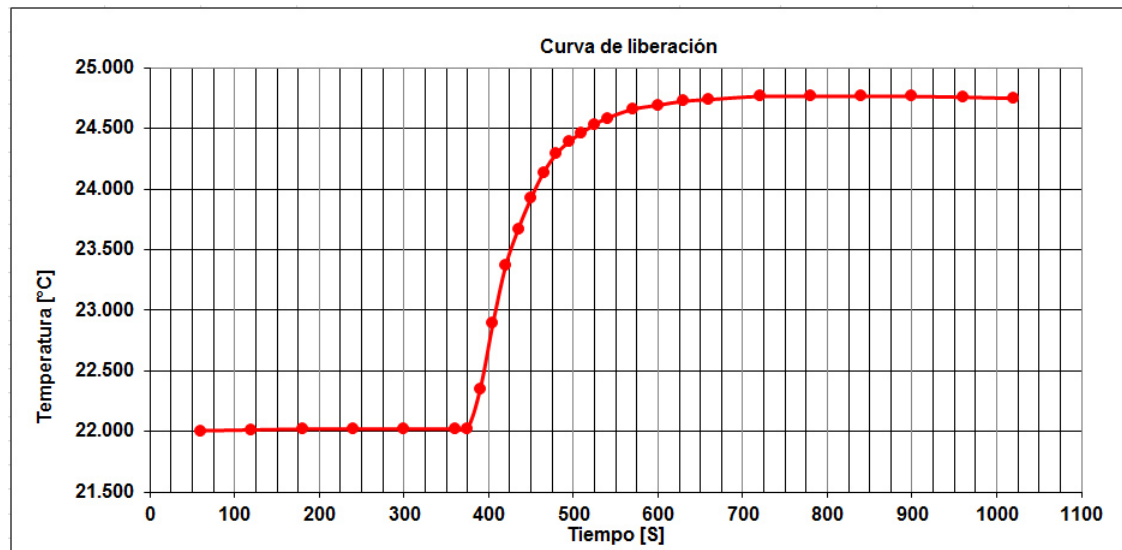


Figura 3.4: Curva de liberación de calor, obtenida con datos de temperatura del calorímetro

3.3 MÉTODO DE OBTENCIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

La norma ASTM D1298-99 [55], *Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) o gravedad API de petróleo crudo y productos*

de petróleo líquido por el método del hidrómetro describe la manera de determinar la densidad y la gravedad específica, utilizando un hidrómetro de vidrio para sustancias como petróleo, mezclas y productos no petrolíferos normalmente manejados como líquidos y que tienen una presión de vapor Reid igual o menor de 101.325 kPa (14.696 psi).

Para determinar la gravedad específica de un combustible líquido, se realiza el siguiente procedimiento: 1) se toma una probeta con 250 mL de la muestra y se sumerge el hidrómetro de 60/60 °F. 2) Se deja estabilizar el densímetro en la probeta. 3) Después que se ha alcanzado el equilibrio térmico, se lee la escala del hidrómetro, como se muestra en la Figura 3.4 y se toma la temperatura de la muestra con un termómetro. Es importante comentar que al momento de realizar este proceso, la temperatura de la muestra y la probeta que la contiene debe de estar a la misma temperatura de referencia 60 °F o 15.56 °C. Si la temperatura observada es distinta a la temperatura de referencia, se corrige la lectura de la gravedad específica mediante la siguiente ecuación:

$$GE_R = \frac{GE_T}{1 - [23 \times 10^{-6}] \cdot (T - R) - 2 \times 10^{-8} \cdot (T - R)^2} \quad (3.4)$$

donde:

- GE_R = es la lectura de la gravedad específica a la temperatura de referencia (R) en °C.
- GE_T = es la lectura de la gravedad específica a la temperatura observada (T) en °C.

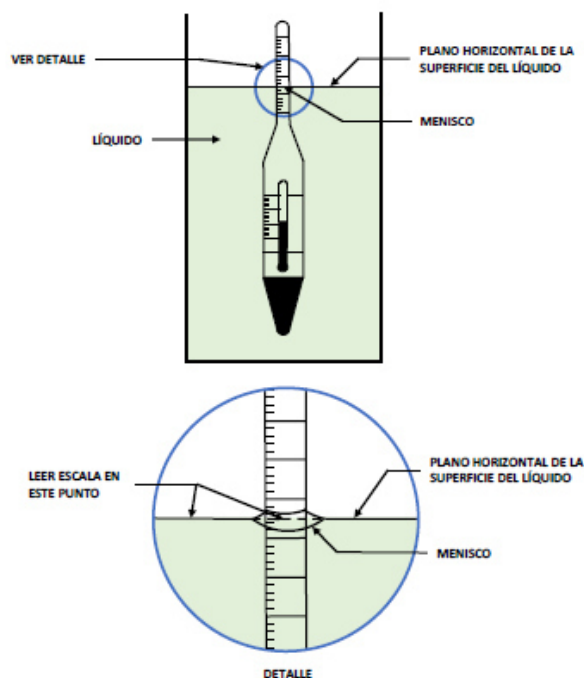


Figura 3.5: Lectura escala hidrómetro. Adaptada de Flor De Lis Corral Gómez [56]

3.4 CROMATOGRAFÍA DE GASES Y MASAS

El método de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas de la norma ASTM D6352 [57], consiste en la determinación de la composición química de un combustible, ya sea en mezclas o puro.

Para este trabajo se utilizó el cromatógrafo *PerkinElmer* modelo CLARUS SQ 8 GC/MS. Este cromatógrafo trabaja en conjunto utilizando un sistema del mismo para adquirir la información. Dicho equipo genera una fase gaseosa y realiza la separación, identificación y cuantificación de los diferentes componentes de la mezcla ver Figura 3.6.

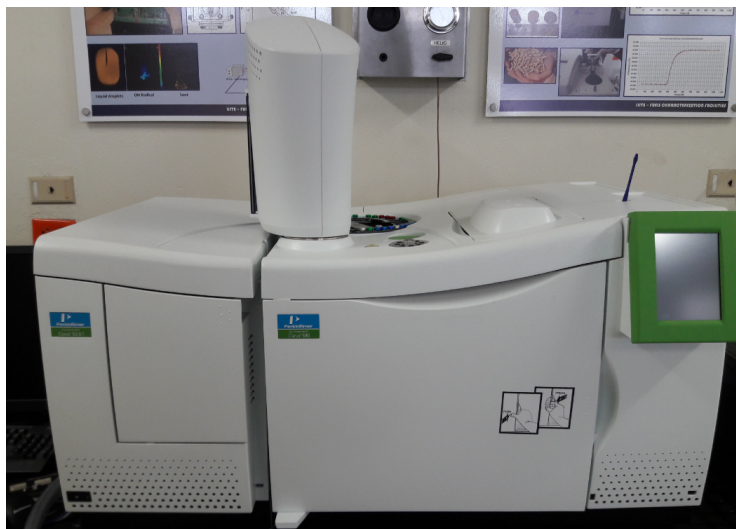


Figura 3.6: Cromatógrafo de gases y masas modelo CLARUS SQ 8 GC/MS

Los componentes fundamentales que conforman un cromatógrafo de gases son:

- Fuente de gas.
- Sistema de inyección.
- Horno y columna cromatográfica.
- Sistema de detección.
- Sistema de registro.

Para realizar una separación mediante cromatografía de gases, se inyecta una pequeña cantidad de muestra a separar en una corriente de un gas inerte (helio) a elevada temperatura; esta corriente de gas atraviesa una columna cromatográfica que separa los componentes de la mezcla por medio de un mecanismo de partición (cromatografía de gas líquido), de absorción (cromatografía gas sólido) o por medio de una mezcla de ambos. Los componentes separados emergen de la columna a intervalos discretos y pasan a través de un sistema de detección adecuado, o bien, son dirigidos hacia un dispositivo de recogida de muestra. En la Figura 3.7 se muestra el esquema general de un cromatógrafo de gases [58].

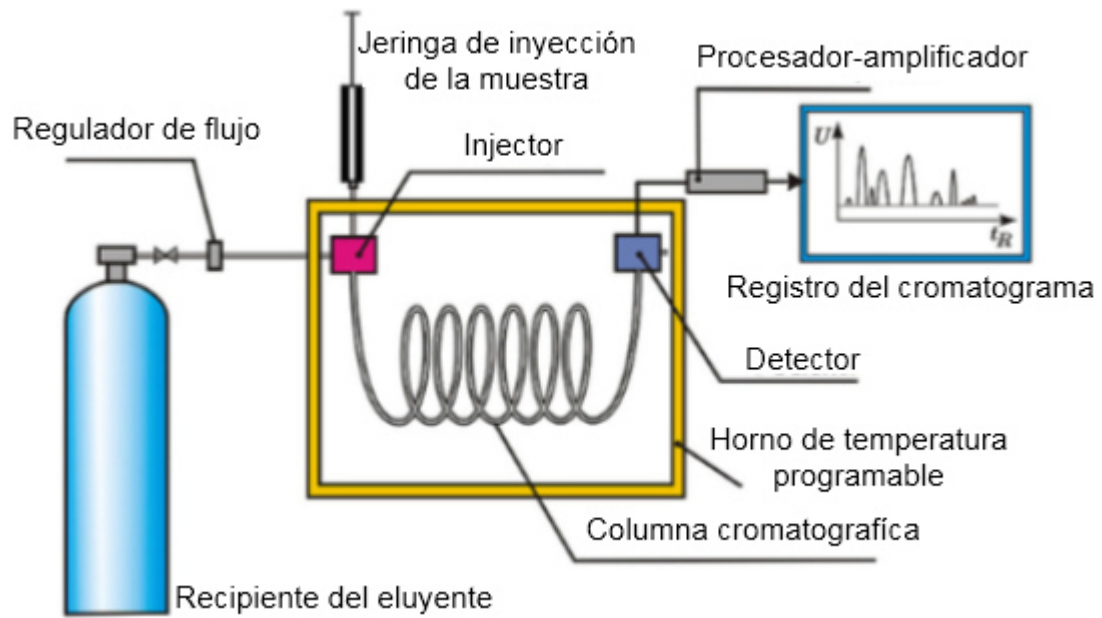


Figura 3.7: Esquema de un cromatógrafo de gases [58]

3.5 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA: TIPO CFR

Para la determinación de la primera fase de combustión, picos de máxima presión en cámara y puntos de autoignición a distintas relaciones de compresión, se hace uso de un motor tipo CFR el cual es capaz de medir o cuantificar la capacidad que tiene cada combustible de conseguir condiciones de presión y temperatura extremas, sin que se produzca la temida autoinflamación. Este motor se encuentra en el área de fisicoquímica de la combustión del Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE), de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en la Universidad Autónoma de Nuevo León. La instalación está integrada principalmente por un motor monocilíndrico de compresión variable tipo CFR; cuenta con todos los sistemas auxiliares que permiten su funcionamiento, así como el control y monitorización de las variables antes mencionadas. En la Figura 3.8 se muestra el motor de combustión interna tipo CFR de compresión variable.



Figura 3.8: Motor de combustión interna tipo CFR de compresión variable

El motor CFR de compresión variable cuenta con los sistemas auxiliares necesarios para su adecuado funcionamiento, esto con base en la norma ASTM [59, 60]. Este motor permite el movimiento en arrastre y una velocidad constante de 900 rpm. El circuito de lubricación garantiza una presión en el circuito de aceite de 28 psi para el correcto funcionamiento del motor, del mismo modo, se cuenta con sistemas de seguridad capaces de detener automáticamente el motor eléctrico, esto en caso de que la presión del aceite en el circuito de lubricación sea de 25 psi. Finalmente, el circuito de refrigeración/calentamiento establece la temperatura de la culata del motor en 70 °C antes del comienzo de los experimentos. Este sistema también se encarga de mantener constante dicha temperatura una vez que se produce la combustión en el motor.

Para llevar a cabo el control, monitorización y registro de todas las variables experimentales de interés, el motor cuenta con un sistema de adquisición de datos y control, en el cual todas sus funciones están conectadas a un controlador NI cRIO 9074; al mismo tiempo se comunica a única aplicación con una interfaz gráfica de usuario en la PC del laboratorio.

Con respecto al sistema de adquisición de datos, la medida de presión en cámara ha sido adquirida mediante un sistema *YOKOGAWA DL850E*. Este equipo cuenta con un módulo de adquisición de señales de tensión modelo 701205, la cual ofrece una frecuencia de muestreo de 10 MHz. Este sistema también registra las señales de control del inyector y la bujía, generadas por el controlador central, esto para permitir el análisis de presión en cámara desarrollada, determinar de forma automática el inicio de la combustión, al mismo tiempo, coincidente con el disparo de la bujía y tiempo de apertura del inyector.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En esta sección se presentan la metodología empleada para la realización de esta investigación. Como primera fase, se llevo a cabo la ampliación del reactor híbrido tipo batch para la producción de bioetanol. Como segunda etapa, se establecerá una metodología para el proceso de fermentación, así como realizar el proceso de fermentación y destilación para la obtención de bioetanol a partir de jugo de naranja natural. Como tercera etapa, se evaluara y se determinaran las propiedades fisicoquímicas del combustible obtenido. Por ultimo, se analizan los resultados, se obtienen las conclusiones y trabajos futuros de la investigación.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL REACTOR HÍBRIDO TIPO BATCH PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES: BIODIÉSEL Y BIOETANOL

Para la obtención del bioetanol se hace uso del **Reactor híbrido tipo batch para la producción de biocombustibles: biodiésel y bioetanol**, que se encuentra en el área de fisicoquímica de la combustión del Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE), de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Esta instalación experimental cuenta con los sistemas auxiliares necesarios para un desempeño adecuado; incluyendo el control y la monitorización de las variables para la producción de biodiésel.

El proceso de puesta a punto y automatización de la instalación, así como las características técnicas de los componentes son detallados por Solís [54]; no obstante, en el presente documento se realiza una breve descripción de los sistemas que integran la instalación para facilitar su lectura.

En la figura 4.1 se muestra la maqueta del reactor para la producción de biocombustibles (biodiésel y bioetanol) antes de las ampliaciones realizadas durante esta investigación.

Como se puede observar en esta Figura 4.1, la maqueta consta de tres tanques principales: 1) reactor batch, 2) tanque metóxido y 3) tanque decantador. La instalación cuenta con un sensor de temperatura y un sensor de nivel. También cuenta con una resistencia eléctrica de inmersión esto para la adición de calor al proceso de transesterificación, fermentación y destilación.

La instalación cuenta con 2 agitadores neumáticos de hélice marina con tres aspas de la marca GRACO. Por otra parte, también cuenta con tubería de acero

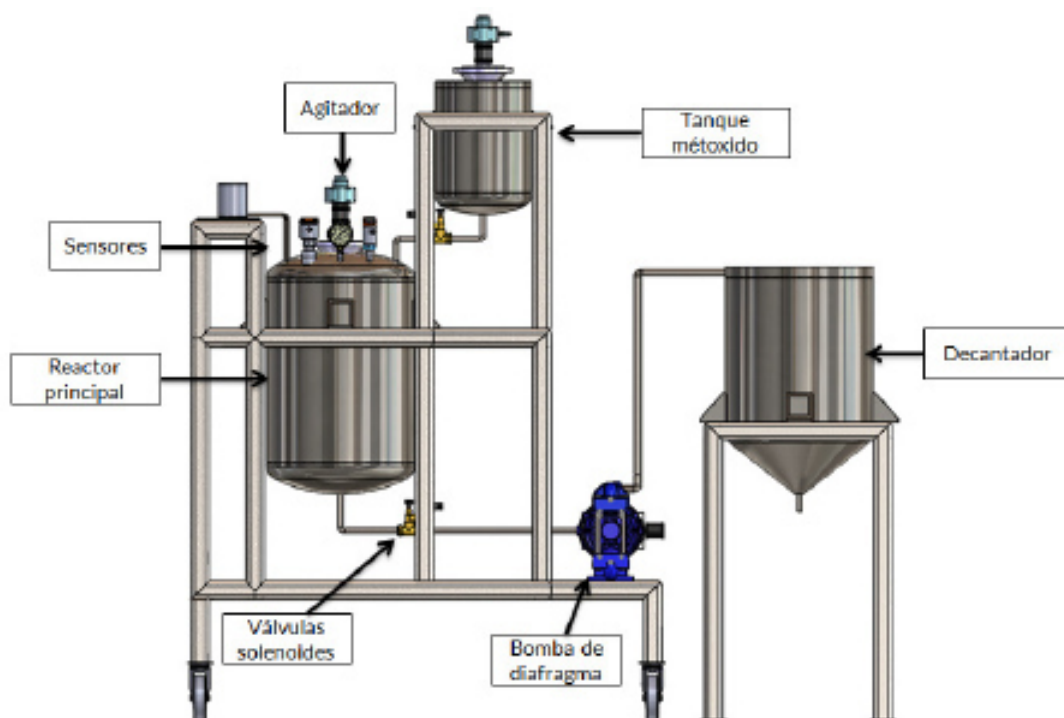


Figura 4.1: Diseño de la maqueta antes de las ampliaciones realizadas [54]

inoxidable de 1/2 in (ID 15.79 mm); así mismo, se instalaron tres válvulas solenoides NTP de 26 W a 120 V, esto para las transferencias de las soluciones.

La instalación cuenta con una interfaz en el software LabVIEW, en donde se lleva a cabo el control y monitorización de todas las variables de interés. El reactor cuenta con un sistema de adquisición de señales para los sensores cDAQ-9174 y 2 tarjetas de adquisición de datos una de entradas analógicas y otra de salida digitales modelo NI-9203 y NI-9472 respectivamente. Los datos se muestran con una única interfaz gráfica de usuario por medio de un ordenador.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DE AMPLIACIONES

PLANTEADAS PARA EL REACTOR HÍBRIDO TIPO BATCH

Con el objetivo de producir bioetanol y controlar las variables en el proceso de fermentación para la realización de esta investigación se llevaron a cabo distintas ampliaciones en la instalación experimental, las cuales se detallan a continuación. También se expone el diseño del reactor de fermentación y sus principales componentes.

4.2.1 DISEÑO DE LOS TANQUES DE SOLUCIÓN ÁCIDA Y BASE

Se siguió el procedimiento descrito por Solís-Ulloa [54] para poder determinar el diámetro y la altura de los tanques de solución ácida y base, tal como se efectúa en las ecuaciones 4.1 y 4.2. Para ello, el volumen de producción del reactor es de 50 litros (0.50 m³) de biodiesel y bioetanol.

En este caso el volumen de las solución ácida y base es de 2.5 % del volumen total del fermento que corresponde a 1.25 litros (0.00125 m³). En los Apéndices A.1 y A.8, se muestran los diseños de los tanques y la estructura en donde van sujetas.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} \cdot V} \quad (4.1)$$

Donde:

- D = diámetro del reactor [m].
- V = volumen [m³].

Sustituyendo en la ec. 4.15.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} \cdot 0.00125 \text{ m}^3}$$

$$D = 0.116 \text{ m}$$

Por otra parte, la altura del reactor se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad (4.2)$$

donde:

- H = altura del reactor [m].
- V = volumen [m³].
- D = diámetro [m].

$$H = \frac{4 \cdot 0.00125 \text{ m}^3}{\pi \cdot (0.40 \text{ m})^2}$$

$$H = 0.16 \text{ m}$$

4.2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL TANQUE

FERMENTADOR

El reactor de fermentación consta de una capacidad volumétrica de 60 litros. El cual, esta conformado por un cilindro de acero inoxidable de diámetro 0.40 m y 0.50 m de altura. Cuenta con un fondo torriesférico, agitador tipo hélice, resistencia, accesorios, conexiones y estructura para el fermentador.

La entrada de la solución es tipo circular con una brida versátil para el buen manejo. En la salida principal se empleó una válvula solenoide NTP de diámetro de 1/2 in. Las entradas de la solución ácida y base, también cuentan con válvulas solenoide NTP de 1/2 in en acero inoxidable.

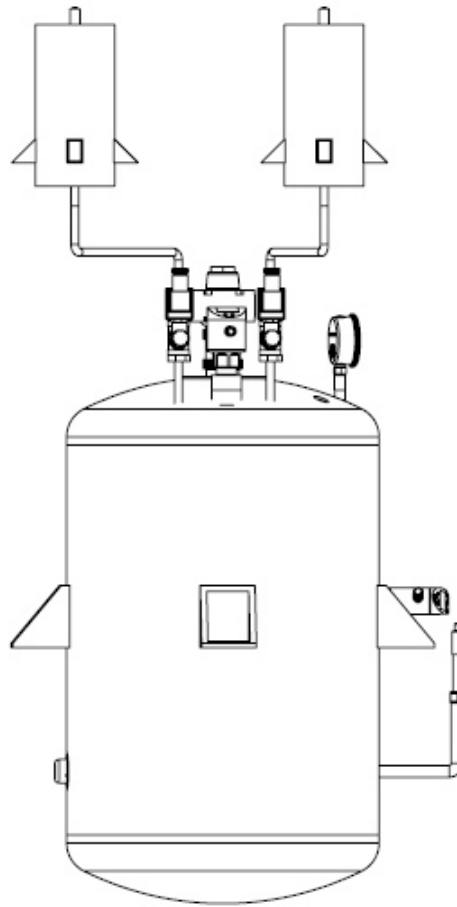


Figura 4.2: Diseño del reactor de fermentación

Descripción del biorreactor

- Reactor batch: es de forma cilíndrica con un fondo torresferico y es el tanque principal de la solución donde se lleva a cabo la transesterificación y fermentación.
- Agitador neumático: es el principal componente del sistema de agitación, contiene tres aspas tipo hélice. Está acoplado a una barra cilíndrica de 2 in de

diámetro, y su principal función es mantener homogénea la solución.

- Resistencia eléctrica de inmersión: tiene como función la adición de calor al proceso de fermentación y destilación. Es una resistencia eléctrica de inmersión de 2000 W monofásica de 120 V.
- Termopar tipo K: ayuda al monitoreo de la temperatura durante el proceso, en caso de una elevada o baja temperatura.
- Sensor de nivel: nos ayuda a saber los litros de solución existentes dentro del reactor.
- Manómetro: es un instrumento que nos permite medir la presión del fluido de trabajo.
- Salida de CO₂: se emplea para liberar el exceso de CO₂ en la fermentación.
- Entrada de la solución: en ella se suministra la solución del reactor principal.
- Válvula de salida de la solución: por la cual se lleva a cabo el vaciado del medio después del proceso de destilación.
- Tanque de solución ácida y base: son de forma cilíndrica de 4 in de diámetro y 0.16 m de altura y en el se almacenan dichas soluciones.
- Entrada de solución ácida y base: para los casos en que la solución no esté entre el rango aceptable del pH para el crecimiento de la levadura por medio de dos válvulas solenoide añadimos estas soluciones, según sea el caso.

Nota: para la construcción de los tanques de solución ácida y base, se utiliza lamina en acero inoxidable T-304 cédula 40 calibre 16 in. Las características principales son:

- Largo ciclo de vida.
- Excelente factor de higiene y limpieza.

- Resistencia a la corrosión en cuanto en entornos altamente corrosivos.
- Resistencia a altas temperaturas y bajas temperaturas manteniendo sus propiedades.

4.2.3 DISEÑO DEL CONDENSADOR

En esta sección se tiene como objeto el cálculo y diseño de las partes constituyentes de un condensador de serpiente (destilador) para la producción de bioetanol, las cuales se detallan a continuación.

Nota: Debido a que el mayor porcentaje de la fermentación (mezcla) está constituido por agua, los cálculos se realizaron tomando las propiedades de la fermentación como si se tratara únicamente de agua.

- Volumen del fermento: $V = 50$, $L = 0.050 \text{ m}^3$.
- Temperatura inicial del fermento: $T_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Temperatura que debe alcanzar el fermento $T_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, para garantizar la evaporación de etanol el cual su punto de ebullición es $78 \text{ }^\circ\text{C}$, datos de Tabla [61].

$$(C_p)_{mezcla} \approx (C_p)_{agua} = 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$(h_{fg})_{etanol} = 838.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\delta_{mezcla} = \delta_{agua} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Donde:

- C_p = calor específico [kJ/kg°C].
- h_{fg} = calor latente de vaporización [kJ/kg].
- δ = densidad [kg/m³].

Cálculo del calor sensible

El calor sensible es la cantidad de calor necesario para elevar en una unidad (°C) la temperatura de la unidad de masa (gramos) de la sustancia, el cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.3)$$

$$m = \delta \cdot V \quad (4.4)$$

donde:

- Q_s = calor sensible [kJ/s].
- \dot{m} = flujo másico [kg/h].
- ΔT = diferencia de temperatura entre T_1 y T_2 [°C].
- m = masa [kg].
- V = volumen [m³].

$$m = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.05 m^3 = 50 kg$$

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = 50 \frac{kg}{h} \quad (4.5)$$

Donde:

- $t =$ tiempo [h].

$$Q_s = 50 \frac{kg}{h} \cdot 4.186 \frac{kJ}{kg^\circ C} \cdot (78 - 25)^\circ C$$

$$Q_s = 11,092.9 \frac{kJ}{h} = 3.08 \frac{kJ}{s}$$

Cálculo del calor latente

Es la energía requerida para el cambio de fase de la evaporación. Por reglas de las fases y evidencia empírica, los procesos de cambio de fase ocurren siempre a temperatura y presión constantes.

$$Q_L = \dot{m}_{etanol} \cdot h_{fg} \quad (4.6)$$

Donde:

- $Q_L =$ calor latente [kJ/s].
- $\dot{m}_{etanol} =$ flujo másico del etanol [kg/h].

Debido a que únicamente el etanol cambia de fase, se consideró un flujo másico aproximado tomando un porcentaje total, que es de un 10% [61].

$$\dot{m}_{etanol} = \dot{m} \cdot \%etanol \quad (4.7)$$

$$\dot{m}_{etanol} = 50 \frac{kg}{h} \cdot 0.10 = 5 \frac{kg}{h}$$

$$Q_L = 5 \frac{kg}{h} \cdot 838.3 \frac{kJ}{kg} = 4,191.5 \frac{kJ}{h}$$

$$Q_L = 1.164 \frac{kJ}{s}$$

Cálculo del calor total

$$Q_T = Q_s + Q_L \quad (4.8)$$

$$Q_T = 11,092.9 \frac{kJ}{h} + 4,191.5 \frac{kJ}{h}$$

$$Q_T = 15,284.4 \frac{kJ}{h} = 4.25 kW = 4,250 W$$

Con base en los cálculos realizados se necesita una resistencia de 2.1 kW para destilar 50 litros de la fermentación, aproximadamente en dos horas.

Flujo de calor en el vapor del etanol

- Calor latente.

$$Q_L = \dot{m}_{etanol} \cdot h_{fg}$$

$$Q_L = 5 \frac{kg}{h} \cdot 838.3 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_L = 4,191.5 \frac{kJ}{h} = 1.164 \frac{kJ}{s}$$

- Calor sensible.

$$Q_s = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

- $T_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$.
- $T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- $C_{p(\text{etanol})} = 2.46 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$.

$$Q_s = \left(\frac{5 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) \cdot \left(2.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) \cdot (92 - 25)^\circ\text{K} \quad (4.9)$$

$$Q_s = 799.5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 0.222 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

- Calor total.

$$Q_T = Q_L + Q_s$$

$$Q_T = 4,191.5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + 799.5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Q_T = 4991 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 1.386 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Cálculo del caudal másico de agua requerido

$$Q_{\text{perdido}(\text{etanol})} = Q_{\text{ganado}(\text{agua})}$$

$$4991 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = m_{\text{agua}} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$4991 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = m_{\text{agua}} \cdot 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (10 - 4)^\circ\text{C}$$

$$m_{agua} = \left(\frac{4991 \frac{kJ}{h}}{4.186 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}} \right) \cdot (10 - 4)^{\circ}C$$

$$m_{agua} = 199 \frac{kg}{h} = 0.0553 \frac{kg}{s} \rightarrow \text{Caudal del serpentín}$$

Se asumió un serpentín de acero inoxidable de 1/4 in.

- $D_{ext} = 0.1016$ [m].
- $A_i = 0.0089$ [mm].

$$Q = \frac{V}{A} \tag{4.10}$$

$$V = \left[\left(\frac{1.4x^{-3} \frac{kg}{s}}{848.9 \frac{kg}{m^3}} \right) \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot (0.1016 m^2) \right]$$

$$V = 2.03x10^{-4} \frac{m}{s}$$

Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD)

- Temperatura del fluido frío (agua).

$$T_{ent} = 4^{\circ}C \text{ y } T_{sal} = 10^{\circ}C$$

- Temperatura del fluido caliente (vapor).

$$T_{ent} = 78^{\circ}C \text{ y } T_{sal} = 25^{\circ}C$$

Cálculo de la temperatura T_x

$$Q_{perdido(etanol)} = Q_{ganado(agua)}$$

$$4,191.5 \frac{kJ}{h} = m_{agua} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.11)$$

$$4,191.5 \frac{kJ}{h} = 199 \frac{kg}{h} \cdot 4.186 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \cdot (25 - T_x)^{\circ}C$$

$$T_x = 25^{\circ}C \left[\frac{4191.5 \frac{kJ}{h}}{\left(199 \frac{kg}{h} \cdot 4.186 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}\right)} \right]$$

$$T_x = 19.97^{\circ}C$$

Cálculo del LMTD para condensación

$$LMTD_c = \left[\frac{\Delta T A - \Delta T B}{\ln \left(\frac{\Delta T A}{\Delta T B} \right)} \right] \quad (4.12)$$

$$LMTD_c = \left[\frac{(78 - 25) - (78 - 19.97)}{\ln \left(\frac{78-25}{78-19.97} \right)} \right]$$

$$LMTD_c = 55.48^{\circ}C$$

Cálculo del LMTD para enfriamiento

$$LMTD_c = \left[\frac{\Delta T A - \Delta T B}{\ln \left(\frac{\Delta T A}{\Delta T B} \right)} \right]$$

$$LMTD_c = \left[\frac{(78 - 19.97) - (10 - 4)}{\ln \left(\frac{78-19.97}{10-4} \right)} \right]$$

$$\text{LMTD}_c = 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor total U

Se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (4.13)$$

donde:

- h_i = coeficiente de transferencia de calor por convección interior [W/m²°C].
- h_o = coeficiente de transferencia de calor por convección exterior [W/m²°C].

Dichos coeficientes se determinan usando las relaciones de convección forzada.

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4.14)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.15)$$

Donde:

- Re = número de Reynolds.
- V = velocidad del fluido [m/s].
- D = diámetro interior de la tubería [m].
- ν = velocidad cinemática [m²/s].
- μ = viscosidad dinámica [kg/m · s].
- ρ = densidad del fluido [kg/m³].

Sustituyendo en la ecuación 4.14 y 4.13 obtenemos:

$$\nu = \left(\frac{1.519x10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}}{1000 \frac{kg}{m^3}} \right)$$

$$\nu = 1.519x10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$Re = \left[\frac{(2.03x10^{-4} \frac{m}{s} \cdot 0.1016m)}{1.245x10^{-6} \frac{m^2}{s}} \right]$$

$$Re = 16.6$$

calculado el número de Reynolds, ahora se procede a calcular el número de Nusselt:

$$Nu = 1.86 \cdot (Re \cdot Pr)^{1/3} \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu} \right)^{0.14} \quad (4.16)$$

$$Nu = 1.86 \cdot (16.6 \cdot 15.12)^{1/3} \cdot \left(\frac{0.1016}{0.40} \right)^{1/3} \quad (4.17)$$

$$Nu = 12.52$$

entonces,

$$h_i = \left[\left(\frac{0.517 \frac{W}{m^2 \cdot C}}{0.0089 m} \right) \cdot (12.52) \right]$$

$$h_i = 727.29 \frac{W}{m^2}$$

$$h_o = \left[\left(\frac{0.4406 \frac{W}{m^2 C}}{0.1016 m} \right) \cdot (12.52) \right]$$

$$h_o = 54.32 \frac{W}{m^2}$$

sustituyendo en la ecuación (4.12), obtenemos el coeficiente de transferencia de calor.

$$U = 54.32 \frac{W}{m^2 C}$$

4.2.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CONDENSADOR

Para el desarrollo del condensador, se realizó el estudio enfocado en las características necesarias bajo las condiciones de operación. Como primer punto se establecieron las condiciones de operación y los rangos de temperatura, la cual no supera los 100 °C, debido a que el bioetanol se vaporiza a aproximadamente 78 °C a 1 atm. Como segundo punto y muy importante, la presión interna para la salida del vapor es menor a 2 bar [18]; para el caso del reactor principal la presión de diseño se cálculo mediante la siguiente la ecuación [54].

$$P = (P_{atm} + P_h) + 2.0692 \text{ bar} \quad (4.18)$$

Donde:

- P_{atm} = presión atmosférica [bar].
- P_h = presión hidrostática [bar].
- P = presión de operación [bar].

Entonces la presión de diseño es:

$$P = (1.01325 + 0.1758) + 2.0692 \text{ bar} = 3.25 \text{ bar}$$

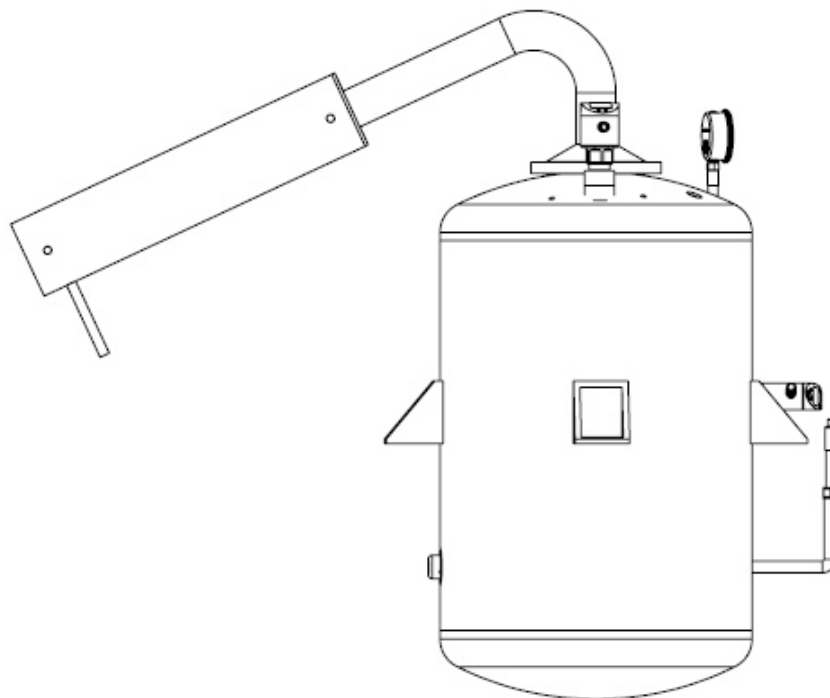


Figura 4.3: Diseño del condensador acoplado al reactor batch

Para la construcción del condensador se empleó un cilindro T-304 calibre 4 in, un tubo de 2 in de cédula 40, un tubo de 1/2 in y un serpentín de 1/4 in todo en acero inoxidable.

Principales componentes del condensador

- Bridas: esta pieza va sujeta en la parte superior del reactor mediante 6 tornillos de acero al carbón. Para la salida del vapor esta sujeto a un tubo de 2 in de cédula 40 y con base a la norma ASTM D86-04 [52] Método de prueba estándar para la destilación de productos del petróleo a presión atmosférica debe tener un ángulo de 75 °C y mediante otra brida acoplado al condensador. En el [Apéndice A.2 y A.3], se muestra el diseño de las bridas.

- Serpentín: por medio del cual se lleva a cabo la transferencia del refrigerante (agua fría). Esta compuesto por un tubin de 1/4 in, este serpentín tiene un diámetro de 3 in, una longitud de 40 cm y 1.5 cm de separación entre cada vuelta del espiral.
- Entrada y salida del refrigerante: en la toma inferior del condensador se conecta una manguera y en la toma superior se conecta la manguera de drenaje, esta última va a dar al sistema de recirculación del refrigerante.
- Coraza del condensador: por medio del cual se lleva a cabo la condensación del vapor proveniente del reactor, es un cilindro con una longitud de 45 cm y tiene como diámetro 4 in.

En los [Apéndices A.4 - A.7], se muestran los diseños de las partes que constituyen del condensador.

4.2.5 CONTROL DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN Y DESTILACIÓN

En esta sección se tiene como objeto controlar y monitorizar las variables de interés de la fermentación y destilación para la obtención del bioetanol. Como previamente se a mencionado la instalación experimental ya cuenta con un programa para llevar a cabo el control de las variables en el proceso de producción del biodiésel.

Sin embargo, dicho programa no esta adecuado para llevar a cabo el control y monitorización de las variables en el proceso de fermentación y destilación para la producción de bioetanol. Por lo anterior, se realizó una modificación al programa en el Software LabVIEW para monitorizar las variables de interés de este proceso.

La maqueta ya cuenta con dos sensores; a) sensor de nivel: modelo LR3000 la cual incluye una sonda de 50 cm de longitud y b) sensor de temperatura; modelo

TN2445 ambos de la marca IFM con salida analógica de 4-20 mA como se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.4: Sensores utilizados en el reactor

También cuenta con una resistencia de inmersión eléctrica de 2 kW monofásica de 120 volt para la adición de calor a los procesos requeridos.



Figura 4.5: Resistencia eléctrica de inmersión monofásica

Por otra parte, el sensor de nivel LR3000 no es apto para llevar a cabo el proceso de destilación ya que tiene una temperatura de trabajo de 0 - 80 °C, por tal motivo, se instaló el sensor modelo LR2759 con un rango de temperatura de -40 a 150 °C la cual incluye una sonda modelo E43340 de 500 mm de longitud. También se reemplazó el sensor de temperatura por un termopar tipo K, con un rango de temperatura de -200 a 1250 °C, esto para tener un mejor control de la temperatura.



Figura 4.6: Sensor de nivel LR2759 y termopar tipo K

También, se instaló un manómetro de presión analógico lleno de glicerina con un rango de 0-7 kg/cm² esto para medir la presión del fluido del trabajo Figura 4.7.



Figura 4.7: Manómetro de presión analógico

También se instalaron dos válvulas solenoides NTP normalmente cerradas de 1/2 in, de 17.1 W a 120/60 V en acero inoxidable para la adición de la solución ácida y base según sea el caso. En los [Apéndice A.10 - A.12], se muestran los diseños de los conectores para las válvulas.



Figura 4.8: Válvulas solenoide en acero inoxidable

Con el fin de poder medir el pH en la fermentación, se instaló un pH transmisor modelo TR-PHT1A4 con un rango de 0-14 y una salida analógica de 4-20 mA. En el [Apéndice A.9], se muestra la pieza de conexión para el potenciómetro.



Figura 4.9: PH transmisor de la marca RIXEN

Así mismo, se instaló una bomba de agua sumergible modelo 2E-38N de 60 Hz a 127 V para la recirculación del refrigerante (agua) como se muestra en la Figura 4.10.



Figura 4.10: Bomba de succión sumergible

También se realizó una modificación a la caja de control, en el cual se instaló una fuente de 24 V y 5 A para la alimentación de los relevadores utilizados en la apertura y cierre de válvulas Figura 4.11.



Figura 4.11: Fuente de poder

Por último, se realizó un cambio al programa para el control de apertura y cierre de las válvulas de las soluciones por medio de relevadores con bobina a 24 V, asimismo, monitoreo de la temperatura y el nivel del fluido dentro del reactor, también se realizó un control on/off de la resistencia para que se mantuviera en un valor de temperatura de 28 - 32 °C para el proceso de fermentación y para la

destilación en un rango de 78 - 90 °C en la Figura 4.12 se muestra el panel de control del programa modificado que sirve para la operación del bioreactor.



Figura 4.12: Panel de control tras la modificación realizada del programa en el Software LabVIEW

Para la obtención de las señales de los sensores, la maqueta experimental cuenta con un sistema de adquisición de datos modelo CompactDAQ-9174 de la empresa National Instruments (NI) como se muestra en la Figura 4.13. Este componente cuenta con 4 ranuras donde se conectan los diferentes tipos de módulos.



Figura 4.13: Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utilizaron dos tarjetas una de entradas analógicas modelo NI-9203 y otra de salidas digitales modelo NI-9472 ambas de la serie C de 8 canales, en las Figuras 4.14 y 4.15 se muestran los módulos utilizados. El chasis cDAQ-9174 USB CompactDAQ es alimentado con una fuente de 24 V.



Figura 4.14: Módulo NI-9203



Figura 4.15: Módulo NI-9472

En la Figura 4.16 se muestra el diseño CAD de la instalación experimental tras las ampliaciones realizadas.

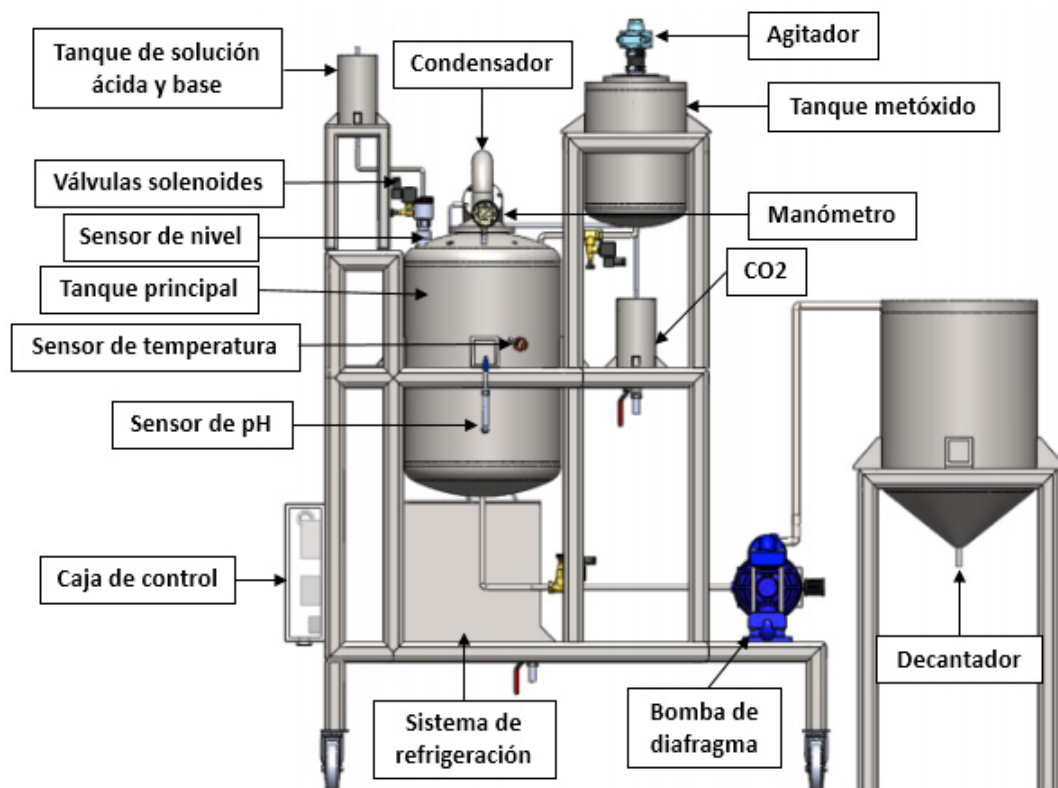


Figura 4.16: Diseño CAD del prototipo tras las ampliaciones realizadas

4.3 METODOLOGÍA DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN Y DESTILACIÓN

4.3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL JUGO DE NARANJA A NIVEL LABORATORIO

Con el fin de obtener una matriz de experimentos que se puedan llevar a cabo en el reactor híbrido tipo batch, se decidió realizar un diseño de experimentos, a partir de las variables que influyen en el proceso de fermentación como se muestra en la Figura 4.17.

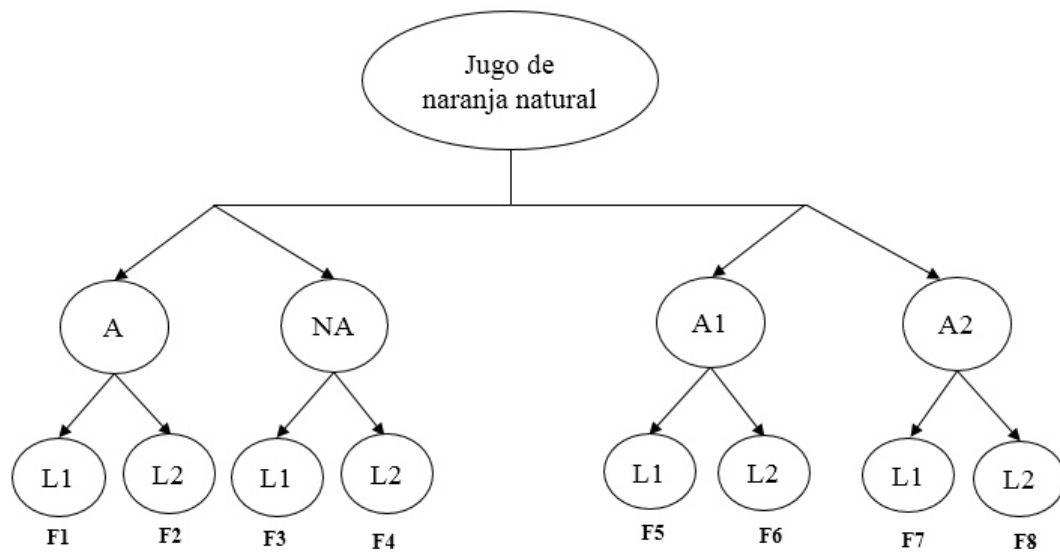


Figura 4.17: Diagrama del diseño de experimentos

- A: agitación.
- NA: no agitación.
- A1: % de azúcar 17 °Brix.

- A2: % de azúcar 20 °Brix.
- L1: % de levadura 2 gr/L.
- L2: % de levadura 3 gr/L.

En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros seleccionados para este diseño experimentos.

Tabla 4.1: Rangos de las variables independientes

Variables						
Fermentaciones	Agitación rpm	Levadura g/L	°Brix	pH	T (°C)	
F1	150	2	12	4.4	26	
F2	150	3	12	3.5	28	
F3	No agitación	2	12	4.4	28	
F4	No agitación	3	12	4.5	27	
F5	No agitación	2	17	4.4	27	
F6	No agitación	3	17	4.6	26	
F7	No agitación	2	20	4.4	26	
F8	No agitación	3	20	3.7	28	

- F: indica el número de fermentaciones de 1-8.

Nota:

Las fermentaciones **F5 - F6**, se ajustaron a 17 °Brix y las fermentaciones **F7 - F8**, se ajustaron a 20 °Brix con sacarosa (azúcar comercial). Esto, para incrementar la graduación alcohólica del etanol al obtener.

Así mismo, las variables que afectaron a la conversión de los azúcares a etanol se seleccionaron en base a la literatura, las cuales se describen a continuación:

Temperatura: Es uno de los parámetros más importante en este proceso, ya que la levadura crece en un rango de temperatura de 28 y 32 °C, bajo este rango

la levadura presenta mayor crecimiento y por lo tanto mayor rendimiento en la producción. Pero puede tolerar temperaturas de un rango de 20 a 50 °C.

pH: El pH óptimo para el desarrollo de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* oscila entre 3.5 y 5. Sin embargo, puede tolerar un rango de pH de 3 y 10. Durante el crecimiento los metabolitos son liberados al medio de cultivo. Por lo tanto se debe controlar el pH del fermento añadiendo ácido o una base cuando este no se encuentre en el rango de crecimiento óptimo y así poder mantener constante el pH.

% SST (°Brix): Son sólidos solubles totales SST, es uno de los parámetros en los cuales se conoce la concentración de azúcar en el jugo de naranja natural. Al iniciar el proceso de fermentación se deben medir los grados °Brix, esto para comprobar que se cuenta con la cantidad suficiente de azúcares para la producción de bioetanol, para el caso del jugo de naranja natural generalmente se encuentra en un rango de 7 a 14 % [18].

4.3.2 DESARROLLO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL A NIVEL LABORATORIO

En este apartado se muestra el esquema de la metodología del proceso de fermentación y destilación para la producción de bioetanol a partir de jugo de naranja.

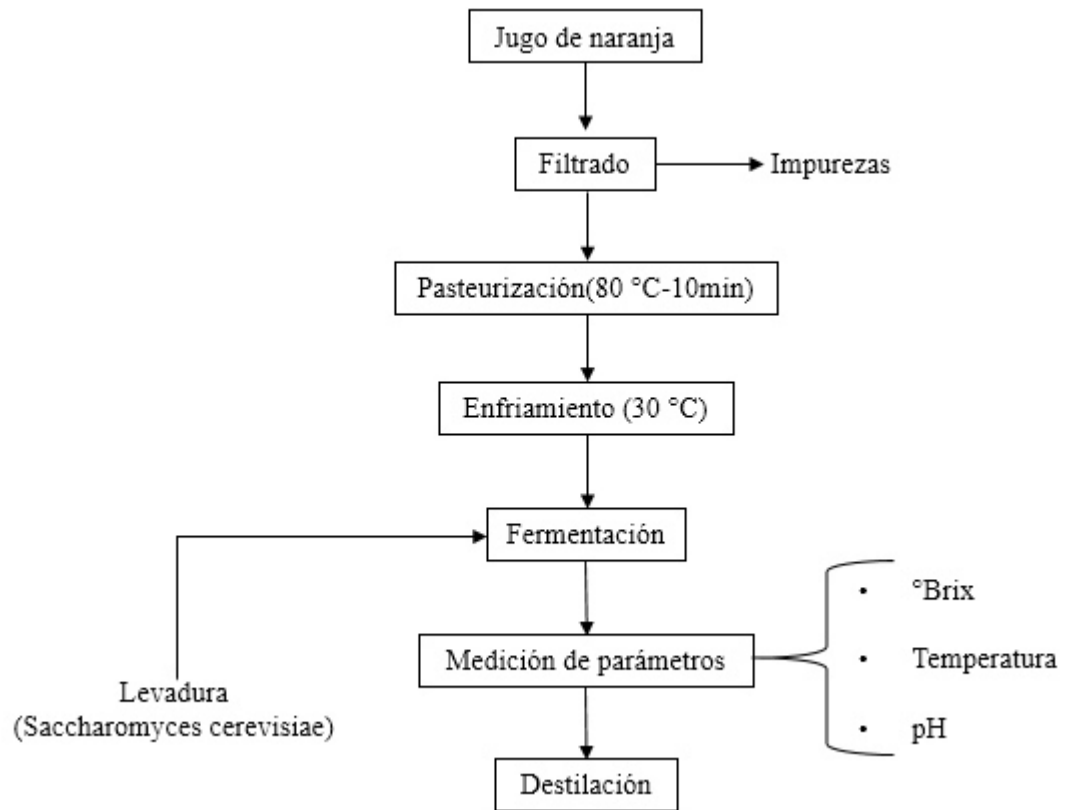


Figura 4.18: Esquema del proceso de fermentación y destilación

4.3.3 PROCESO DE FERMENTACIÓN A NIVEL LABORATORIO

■ **Materia prima:**

Para la realización del experimento referente a la fermentación se utilizó jugo de naranja natural (Figura 4.19).

■ **Filtración, pasteurización y enfriamiento:**

Obtenido el jugo de naranja, fue transportado a las instalaciones del Laboratorio de Ciencias de los Combustibles, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. Con el fin de eliminar las impurezas solidas presentes en el jugo, se realizó el proceso de filtración por gravedad, el cual consiste en colocar un colador metálico en un vaso de preci-

pitado de 750 mL y se procede a filtrar el jugo Figura 4.20.



Figura 4.19: Jugo de naranja natural

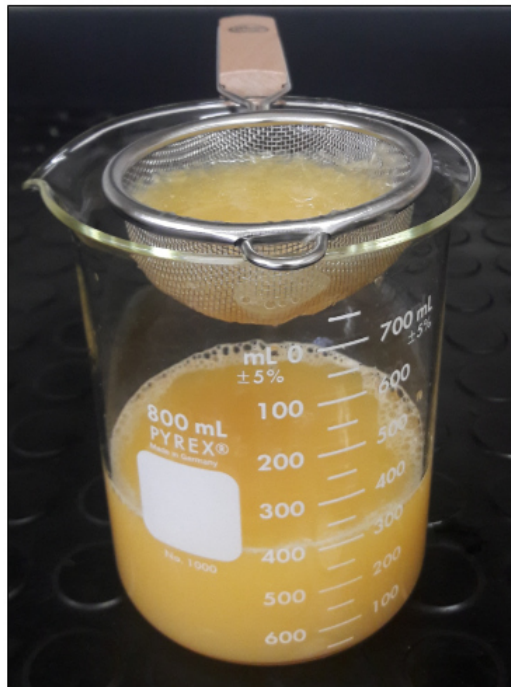


Figura 4.20: Filtración por gravedad

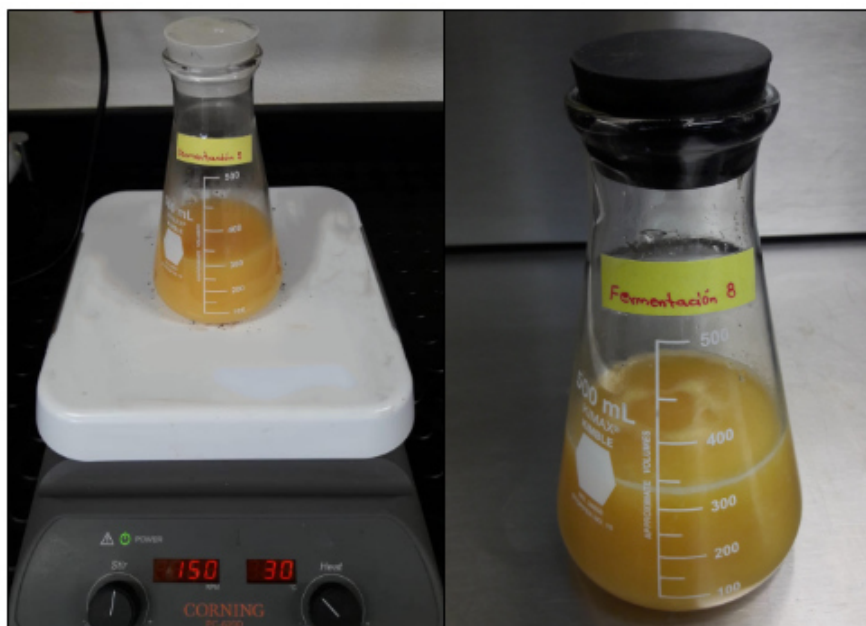
Después de haber filtrado el jugo, fue sometido a un proceso de calentamiento a una temperatura de 80 °C, por un periodo de 10 minutos con la finalidad de eliminar microorganismos indeseables en la fermentación como se muestra en la Figura 4.21, posteriormente se enfrió el jugo hasta una temperatura de 30 °C.



Figura 4.21: Pasteurización del jugo

■ Fermentación:

El jugo de naranja pasteurizado con una temperatura de 30 °C, fue sometido al proceso de fermentación, se agregaron diferentes concentraciones de sacarosa, levadura, con una agitación constante de 150 rpm y sin agitación. Se aseguraron que las condiciones de temperatura (28 - 32 °C) se encontraran en los rangos óptimos para el crecimiento de la levadura. La fermentación se realizó en matraces con una capacidad volumétrica de 500 mL, cada matraz contiene 300 ml de jugo de naranja a fermentar ver Figura 4.22.



a) Agitación

b) No agitación

Figura 4.22: Agregado de levadura comercial (*Saccharomyces cerevisiae*)

- **Medición de parámetros:**

La medición de los distintos parámetros se realizó con un refractómetro de mano, termómetro y potenciómetro. Se tomaron lecturas de datos como: °Brix, temperatura y pH respectivamente, cada 3 h durante el proceso de fermentación. La temperatura y la agitación se controlaron con una parrilla de la marca Corning y modelo agit./canlent.

Nota:

Cuando el pH de la fermentación no se encontrará en las condiciones óptimas para el crecimiento de la levadura *Saccharomyces c.* (3.5 - 5), se agregó solución ácida (ácido fosfórico) o base (hidróxido de sodio) según sea el caso.

Con base a los resultados obtenidos en el diseño de experimentos, en la cual la fermentación **F8** sin agitación, se mantuvo en los parámetros óptimos (Temperatura, pH y °B). Sin embargo, con el objetivo de asegurarse que dicha fermentación era la

indicada para escalar a nivel reactor, se hicieron dos fermentaciones de la misma en condiciones controladas.

En la Tabla 4.2 se muestran los parámetros de la fermentación **F9** y **F10**.

Tabla 4.2: Rangos de las variables independientes

Variables						
Fermentaciones	Agitación rpm	Levadura g/L	°Brix	pH	T (°C)	
F9	150	3	20	3.7	30	
F10	300	3	20	3.9	30	

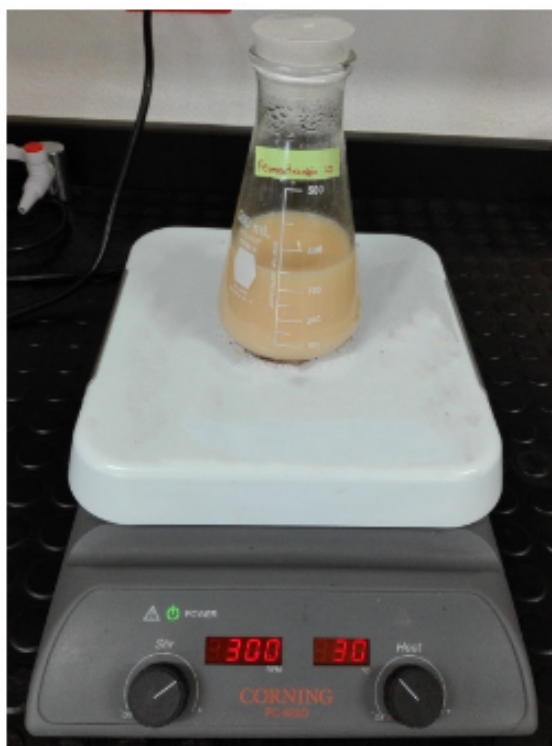


Figura 4.23: Fermentación **F10** con una agitación de 300 rpm

Los resultados obtenidos muestran que la fermentación **F10**, es la indicada para llevar a cabo la fermentación a nivel reactor.

4.3.4 PROCESO DE FERMENTACIÓN A NIVEL REACTOR

Para la realización de este proceso fue necesario asegurarse que no existiría un ambiente anaeróbico en el reactor de fermentación, esto para llevar a cabo el proceso de metabolización de los azúcares.

La producción de bioetanol se llevó a cabo en el reactor híbrido tipo batch, siguiendo el protocolo de fermentación llevado a cabo a nivel laboratorio. La materia prima para la producción de bioetanol fue jugo de naranja principalmente por sus virtudes económicas y accesibilidad. El reactor batch fue diseñado para una capacidad volumétrica de 60 litros. Sin embargo, por seguridad del proceso los ensayos no se llevaron a su máxima capacidad de diseño, razón por la cual el proceso se operó a una capacidad del 90 % del total de su capacidad de diseño. La producción del bioetanol se realizó a partir de 50 litros de jugo de naranja.

Procedimiento:

1. Una vez obtenido el jugo de naranja, este fue transportado a las instalaciones del Laboratorio de Fisicoquímica de la combustión FIME, UANL.
2. Se realizó el proceso de filtración por gravedad para eliminar impurezas, el cual consistió en hacer pasar el jugo de naranja a través de una malla metálica. Primero se colocó la malla metálica sobre la parte superior del tanque principal. A continuación se vertió lentamente el jugo y finalmente, las partículas sólidas fueron retenidas en la malla.
3. Enseguida el jugo se sometió a un proceso de calentamiento a una temperatura de 80 °C durante 10 minutos.
4. Posteriormente se dejó enfriar el jugo hasta una de temperatura de 30 °C.
5. Alcanzada la temperatura estable, el jugo se ajustó a 20 °Brix con sacarosa (azúcar comercial) para incrementar la graduación alcohólica del bioetanol, mediante agitación constante.

6. Por último, se agregó la levadura comercial (*saccharomyces cerevisiae*). Se inició el proceso de fermentación, mediante agitación constante (300 rpm) (Figura 4.24).



Figura 4.24: Inicio de la fermentación a nivel reactor

7. Finalmente se aseguró que las condiciones de pH y temperatura (3.5 - 5 y 28 - 32 °C) se encontrarán en los rangos óptimos para el crecimiento de la levadura.
8. La toma de lectura de los datos de temperatura, pH y °B durante el proceso de fermentación se monitoreo con el control realizado en el software LabVIEW (Figura 4.25).

Nota: Cuando el pH de la fermentación en el reactor no se encontrara en las condiciones óptimas para el crecimiento de la levadura *Saccharomyces c.* Se abrieron las válvulas solenoide 4 y 5 donde se agregaron ácido (ácido fosfórico) o base (hidróxido de sodio), según sea el caso.



Figura 4.25: Lectura de parámetros con el software LabVIEW

Para conocer la concentración de la biomasa, se tomaron datos iniciales debido a que no se cuenta con equipos aptos para realizar esta medición, ya que es necesario mantener en todo momento la esterilidad de la muestra.

En la Figura 4.26 se muestra el diagrama de flujo del proceso de elaboración de la fermentación.

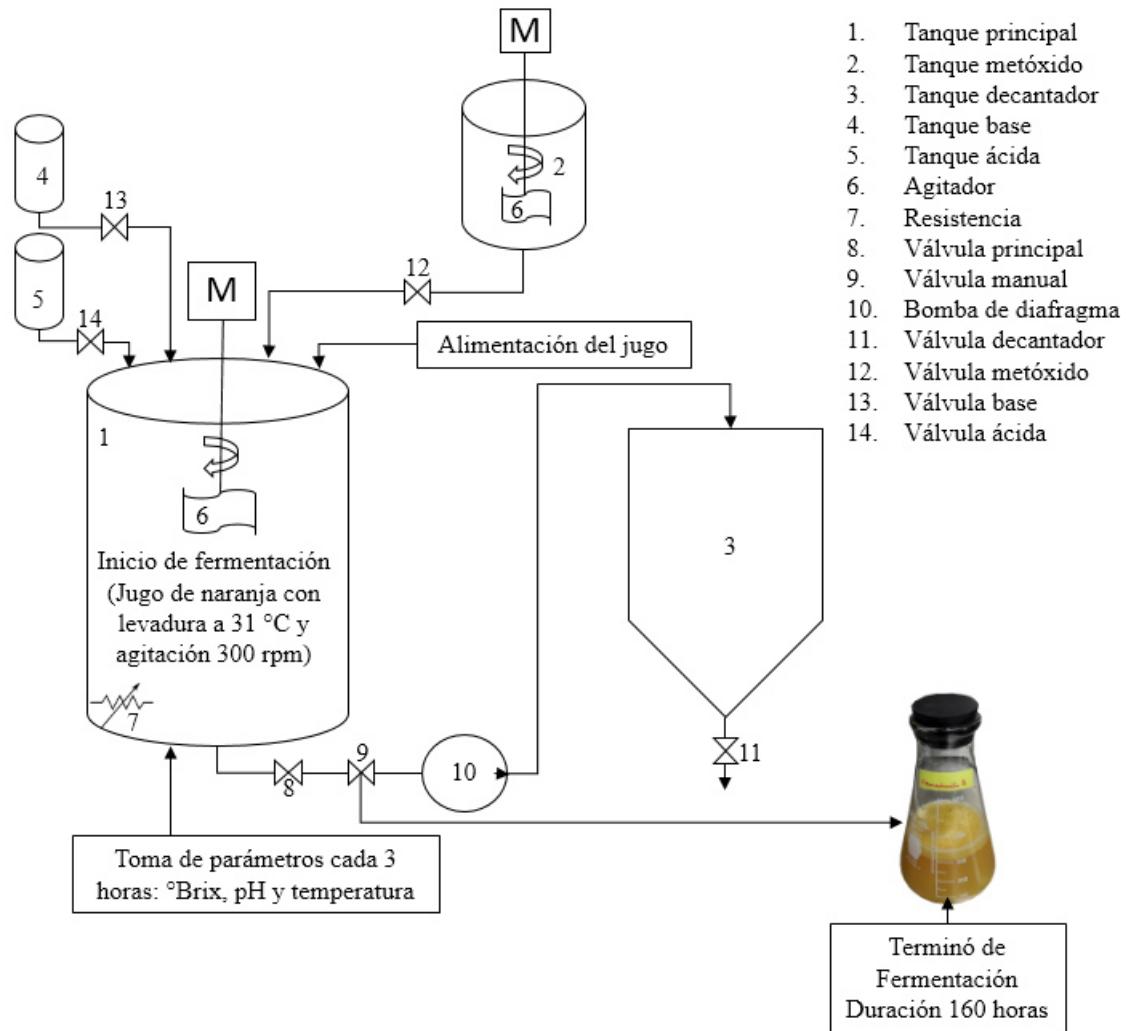


Figura 4.26: Diagrama del proceso de fermentación

4.3.5 PROCESO DE DESTILACIÓN A NIVEL REACTOR

Culminado el tiempo de fermentación en el reactor, se procedió a realizar la etapa de destilación bajo un sistema de tres diferentes rangos de temperatura.

Procedimiento:

1. Se elevó la temperatura a 78 - 80 °C para calentar la mezcla durante cierto tiempo, posteriormente se elevó la temperatura a otro rango de temperatura

de 80 - 85 °C y por último se aumentó a 85 - 90 °C. Para los tres rangos de temperaturas se realizó el cambio de grados una vez que no hubiera ausencia de flujo a la salida del condensador. En la Figura 4.27 se ilustra el control de los tres rangos de temperatura.



Figura 4.27: Lectura de los tres rangos de temperatura con el software LabVIEW

2. Al aumentar los rangos de temperatura del fermento (mezcla de agua y alcohol). Primero entró en ebullición el líquido de menor punto de ebullición (alcohol), enseguida el vapor ascendió y pasó por el condensador.
3. Por el condensador se hizo pasar refrigerante (agua fría) que reduce la temperatura del vapor, condensándolo.
4. Una vez que no hubiera ausencia de flujo a la salida del condensador. Se recoge el destilado (bioetanol). En la Figura 4.28 se muestra el proceso de destilación.



Figura 4.28: Proceso de destilación a nivel reactor

5. Al término del proceso, se abrió la primera válvula solenoide para vaciar la carga del reactor principal.

Nota: En el equipo de destilación la entrada del agua en el condensador fue en la parte inferior y la salida en la parte superior, esto con el objetivo que el destilado se enfriara. El destilado a contracorriente se enfrió más rápido debido a que el agua absorbió la mayoría del calor.

Por otra parte, si se coloca en el mismo sentido el agua cae inmediatamente y no enfría el tubo interno del condensador lo que hace que no se condense correctamente el vapor del destilado.

En la Figura 4.29 se muestra el diagrama de flujo del proceso de destilación para la obtención del bioetanol.

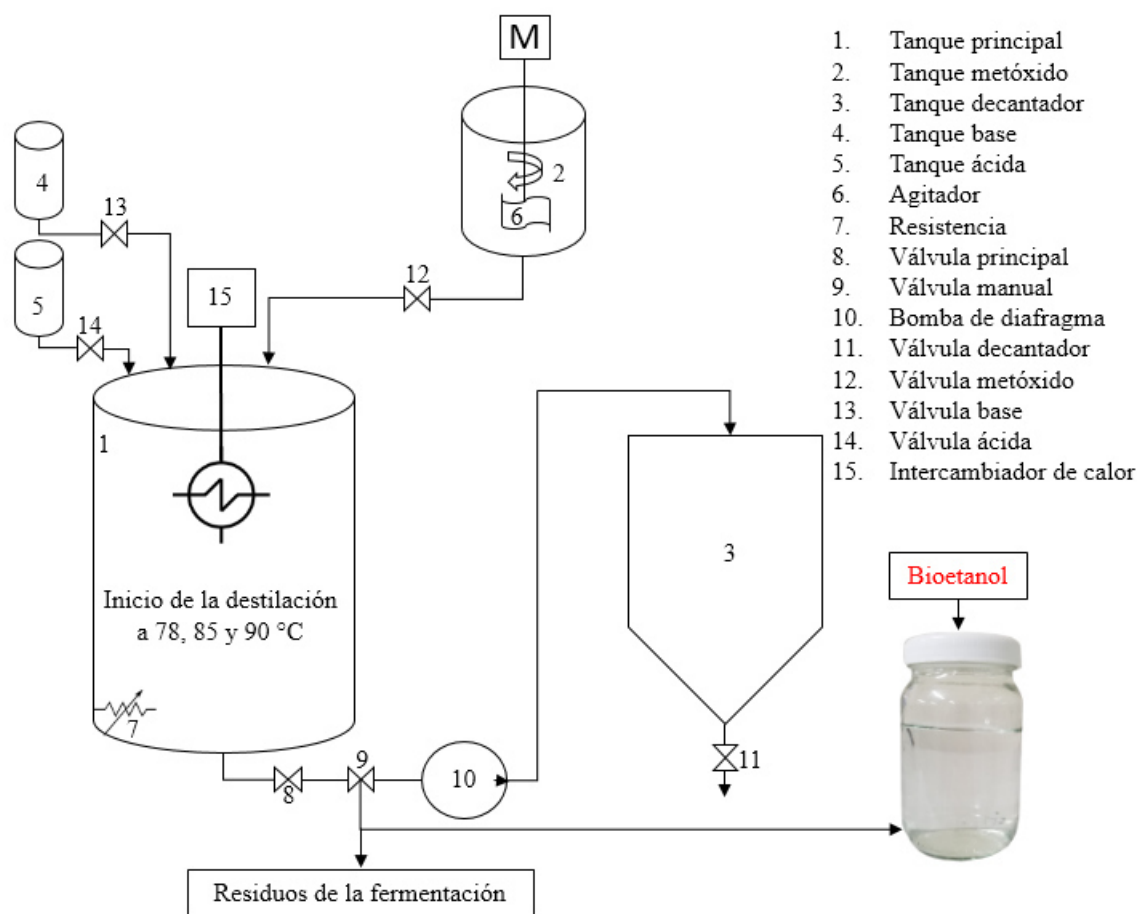


Figura 4.29: Proceso de destilación a nivel reactor

4.4 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL BIOETANOL

El producto obtenido de la destilación (bioetanol) se evaluó a través del método de la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, con el fin de conocer los elementos presentes y porcentaje final de pureza de la muestra.

Se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas (CLARUS SQ 8 GC/MS) con detector de ionización, equipado con una columna capilar de 30.0 m de longitud la cual se operó con helio como gas portador con caudal de 50.0 mL/min, mediante las siguientes condiciones:

1. temperatura inicial de 35 °C durante 8 minutos.
2. temperatura de la rampa 1: 100 °C durante 5 minutos.
3. temperatura de la rampa 2: 250 °C durante 10 minutos.

Para la determinación de la concentración de etanol se emplearon 5 μl de etanol absoluto, bioetanol de reactor y mezclas de los mismos. Y posteriormente fueron inyectados en el cromatógrafo.

4.4.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL BIOETANOL

Obtenido el bioetanol a nivel reactor se procedió a la determinación de las propiedades fisicoquímicas, las cuales se describen a continuación.

- **Poder calorífico superior:** el PCS se calculó a partir del incremento de la temperatura del agua del vaso calorimétrico, del equivalente calorífico del calorímetro y de la aplicación de las correcciones termoquímicas. En el capítulo 3.2 se describió el proceso de dicho método con base la norma ASTM D-240 [53].
- **Gravedad específica:** *método de prueba estándar para densidad por el método del hidrómetro.* Consistió en la comparación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua. En el capítulo 3.3 se explicó dicho método de acuerdo a la norma ASTM D1298-99 [55].

Densidad: la densidad a 25 °C es una de las propiedades que se calculó mediante el método de Riazi y Al-Sahhaf [56].

$$\rho_{25} = 1.05 - \exp(3.80258 - 3.12287 \cdot M^{0.1}) \quad (4.19)$$

Donde:

ρ_{25} = esta en g/m^3 . El error obtenido con el uso de esta ecuación esta por debajo del 0.5 %.

También la densidad se puede determinar a 60 °F (15 °C) con la gravedad específica 60/60 °F:

$$\rho_{15} = GE \cdot \rho_{agua} \quad (4.20)$$

donde:

ρ_{agua} = es la densidad del agua a 15 °C y es igual a 999:016 kg/m^3 .

4.5 PREPARACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLES

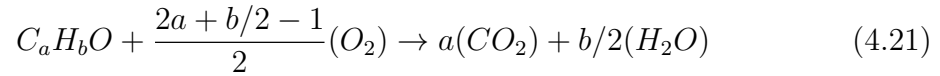
Para la presente investigación se utilizo gasolina regular sin plomo marca *magna*, de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y alcohol (bioetanol) producido en el reactor híbrido tipo batch, a partir de la fermentación de jugo de naranja. Las propiedades de densidades y relaciones A/F de los combustibles puros utilizados en la presente investigación se muestra en Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Propiedades de densidades y relaciones A/F

	Gasolina	Bioetanol
Relación A/F	14.7	8.9431
Densidad a 25 °C (g/mL)	0.7231	0.7895

La relación A/F y la densidad de la gasolina se obtuvieron con base a la literatura [62]. La densidad del bioetanol a 25 °C se calculó mediante el método de gravedad específica descrito en el capítulo 3.3. La relación estequiométrica aire/combustible

del etanol se calculó de forma teórica, a partir de su fórmula molecular (C_2H_5OH) y suponiendo una pureza del 100%. Para ello, se balanceó la reacción de combustión en el cual se obtuvo la proporción entre moles de combustible y moles de oxígeno, según 4.21:



Calculada la relación molar oxígeno/combustible, se utilizó el peso molecular del combustible (46.07 g/mol) y del oxígeno en el cual se obtuvo la relación másica. Para obtener la relación aire/combustible se consideró un contenido másico de oxígeno molecular en el aire del 23.3% [63].

Las propiedades de mayor interés de las mezclas gasolina-bioetanol son la densidad y la relación estequiométrica, mismas que necesita el sistema de control de la instalación experimental CFR para controlar la estequiometría de la combustión, mediante el cálculo del tiempo de apertura del inyector. Las propiedades de las mezclas que se estudiarán, con base a la matriz de experimentos propuesta en la sección 4.6 se muestran en la Tabla 4.4.

Se tuvo en cuenta que el comportamiento de la densidad de la mezcla de combustibles es completamente lineal con la proporción volumétrica de la mezcla, esta se calculó mediante las densidades de los combustibles puros, a través de la media ponderada con la proporción en volumen de los elementos mediante la siguiente ecuación 4.22 [64, 65]:

$$\eta_{mezcla} = \eta_{gas} \cdot X_{v,gas} + \eta_{bio} \cdot X_{v,bio} \quad (4.22)$$

donde:

η_{gas} y η_{bio} = son las densidades a 25 °C de la gasolina y el bioetanol, respectivamente, en g/mL.

X_v = es la concentración volumétrica, en tanto por uno.

Con respecto a la relación estequiométrica aire/combustible de las mezclas, se calculó teniendo en cuenta las densidades de los combustibles puros y de las mezclas, la proporción volumétrica del bioetanol en la mezcla, así como las relaciones A/F de los combustibles, mediante la siguiente ecuación 4.23:

$$AF_{gas} \cdot \eta_{gas} \cdot X_{v,gas} + AF_{bio} \cdot \eta_{bio} \cdot X_{v,bio} \quad (4.23)$$

donde:

AF_{gas} = relación de aire/combustible de la gasolina.

AF_{bio} = relación de aire/combustible del bioetanol

Tabla 4.4: Propiedades de las mezclas gasolina-bioetanol

Proporción (% vol.)	Densidad a 25 °C (g/mL)	Relación A/F
0	0.7231	14.7
5	0.7284	14.3729
10	0.7337	14.0505

4.6 MATRIZ DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

La matriz de ensayos experimentales consta de cinco variables: la relación de compresión del motor (RC), el tipo de alcohol en la mezcla (bioetanol) y su concentración volumétrica. La Tabla 4.5 muestra la matriz de ensayos a empleada en este trabajo.

Tabla 4.5: Matriz de ensayos diseñada

RC	Alcohol	Proporción (% vol.)	°Cigüeñal (APMS)	Temp. Admisión °C
4.6	Bioetanol	0	26	38
7.36		5	18	60
		10		70

La matriz de experimentos se emplearon un total de 2 mezclas de gasolina-etanol (E5 y E10), además del combustible de referencia (G100). Los 3 combustibles estudiados, combinados con las 2 relaciones de compresión y las tres temperaturas de admisión utilizadas, suman un total de 18 ensayos.

Las relaciones de compresión seleccionadas comprenden el valor más pequeño que ofrece la instalación experimental hasta el valor en el que el combustible de referencia (G100) presenta autoignición.

Las proporciones de alcohol se aumentó en un paso del 5 hasta 10 %. Debido a que estas proporciones comprenden las más empleadas a nivel internacional en muchos casos de forma obligatoria por las regulaciones de ciertos países. La adición del 5 % de etanol a la gasolina (E5) es obligatoria en países como Canadá siendo también la mayor proporción permitida en México. La mezcla E10 es considerada sustancialmente similar a la gasolina por la Agencia internacional de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos siendo obligatoria en ciertas partes del país y permitida para su uso en cualquier vehículo de ignición a chispa [63].

Los ensayos se llevaron a cabo con el motor girando a una velocidad constante de 900 rpm, arrastrado por un motor eléctrico acoplado a su eje. El ángulo de disparo de la bujía se determina en función de la relación de compresión del motor, como se observa en la Tabla 4.5, en grados de cigüeñal antes del punto muerto superior (APMS). Estos parámetros experimentales fueron seleccionados de acuerdo a la norma ASTM D2700 [59].

4.6.1 MÁXIMA PRESIÓN EN CÁMARA

Mediante el procesamiento de la señal de presión en cámara se obtienen los dos parámetros del proceso de combustión de interés en esta investigación: la duración de la primera fase de combustión y la presencia e intensidad de autoignición.

4.6.2 DURACIÓN DE LA PRIMERA FASE DE COMBUSTIÓN A DIFERENTES RC

La primera fase de la combustión comprende el intervalo de tiempo entre el disparo de la bujía que provoca el inicio de la reacción de combustión, y el momento en que una pequeña pero medible cantidad de combustible ha sido consumida. Se considera más conveniente medir esta duración en grados de cigüeñal, en lugar de utilizar otra unidad de tiempo como los segundos o alguna de sus subdivisiones, ya que define la fracción de ciclo de motor que ocupa. El paso de grados de cigüeñal a segundos se puede realizar simplemente dividiendo entre $6 N$, siendo N la velocidad de giro del motor en revoluciones por minuto.

En la presente investigación, se considera que la combustión comienza a ser medible, y por tanto, que termina la fase de desarrollo de la llama, en el momento en que la presión en cámara cambia su tendencia con respecto a la presión en cámara obtenida para la misma relación de compresión en modo de arrastre (sin combustión). La medición de la primera fase de la combustión se realiza de forma automática mediante un código desarrollado en Matlab por Rubio-Gómez [63]. Para ello, en primer lugar, se hace coincidir la presión del ciclo con combustión que se está midiendo, en el momento en que se dispara la bujía.

4.6.3 PUNTOS DE AUTOIGNICIÓN

La presencia de autoignición durante la combustión puede ser detectada y medida de forma cuantitativa mediante el análisis de la señal de presión en cámara durante la combustión. El fenómeno de autoignición provoca la aparición de fluctuaciones de alta frecuencia, y cuya amplitud decae con el tiempo.

Para caracterizar el fenómeno de la autoignición para una mezcla de combustibles y unas condiciones experimentales determinadas, el análisis de la señal de presión en cámara se hace para 100 ciclos de combustión, obteniendo el valor promedio de la intensidad de la autoignición. Además, de este análisis, se obtiene la probabilidad de autoignición: porcentaje de ciclos del total en los que se registro autoignición. Se considera que un ciclo de combustión presenta autoignición cuando la intensidad de la misma supera el valor de 50 kPa, valor a partir del cual se comprobó experimentalmente que el knock comienza a ser audible en el motor. Por todo lo anterior reportado por Rubio-Gómez [63].

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Como resultados principales de la presente investigación se tiene: la ampliación de las capacidades y flexibilidad del reactor híbrido tipo batch para la producción de bioetanol, así como los resultados preliminares experimentales obtenidos a nivel laboratorio del proceso de fermentación y resultados finales del proceso de fermentación y destilación a nivel reactor. Enseguida, se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica del bioetanol. Por último, se exponen los resultados de las curvas de presión en cámara, duración de la primera fase de combustión y presencia de autoignición para cada una de las mezclas y relaciones de compresión estudiadas.

5.1 PUESTA A PUNTO DEL REACTOR HÍBRIDO TIPO BATCH PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

En la Figura 5.1 se observan las ampliaciones realizadas del reactor híbrido tipo batch para fermentación y destilación.



Figura 5.1: Puesta a punto del reactor híbrido tipo batch para fermentación y destilación

El reactor de fermentación proporciona un sistema adecuado de agitación homogénea para cubrir las necesidades metabólicas de los microorganismos (300 rpm) a una presión de 15 psi del compresor, cuenta con dos tanques de soluciones ácida y base, que mediante dos válvulas solenoide NTP en acero inoxidable se lleva a cabo el monitoreo de dichas soluciones, según sea el caso, un pH-metro para el control del

pH. También cuenta con una resistencia, un sensor de nivel y un sensor para el control de la temperatura. En el reactor es posible establecer un proceso fermentativo, en el cual se puede observar las distintas fases de crecimiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y que puede considerarse como el crecimiento de poblaciones de muchas millones de células. La levadura *Saccharomyces c.* consume glucosa y fructosa (sacarosa), dos hexosas fáciles de asimilar para su transformación a bioetanol, siempre y cuando exista un ambiente anaerobio [18]. Así mismo, se desarrolló un sistema de destilación que está acoplado a la salida del vapor para la recuperación del bioetanol, así como también un sistema de refrigeración para la circulación del refrigerante, mismo que está acoplado al condensador (Figura 5.1).

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS PARÁMETROS DE MEDICIONES A NIVEL LABORATORIO

El proceso de fermentación a nivel laboratorio se realizó con el fin de determinar los parámetros óptimos para llevar a cabo la fermentación a escala reactor para la producción de bioetanol. Este proceso se realizó con y sin control de las variables que influyen sobre este. Se tomaron mediciones de temperatura, pH, y °Brix cada 3 horas, teniendo un tiempo de fermentación de 30 horas, ya que a este tiempo se observa el máximo crecimiento de las levaduras y la reducción de los azúcares. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

5.2.1 COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE TEMPERATURA

En la Figura 5.2 se observa la variación de la temperatura con respecto al tiempo de cada una de las fermentaciones elaboradas; se puede notar que las temperaturas de fermentación varían durante el proceso en las muestras F3 - F8, puesto que estas se realizan en condiciones ambientales.

Este estudio determinó que la temperatura ambiente osciló entre los 26 y 30 °C en las fermentaciones de los mostos de jugo de naranja, por consiguiente, las muestras F1 y F2 no tienen una variación significativa de este parámetro, ya que fueron controladas por medio de una parrilla tipo corning. Así mismo, se puede observar el consumo de los azúcares por parte de los microorganismos en las muestras con y sin agitación, llegando a obtener una baja concentración en 30 horas.

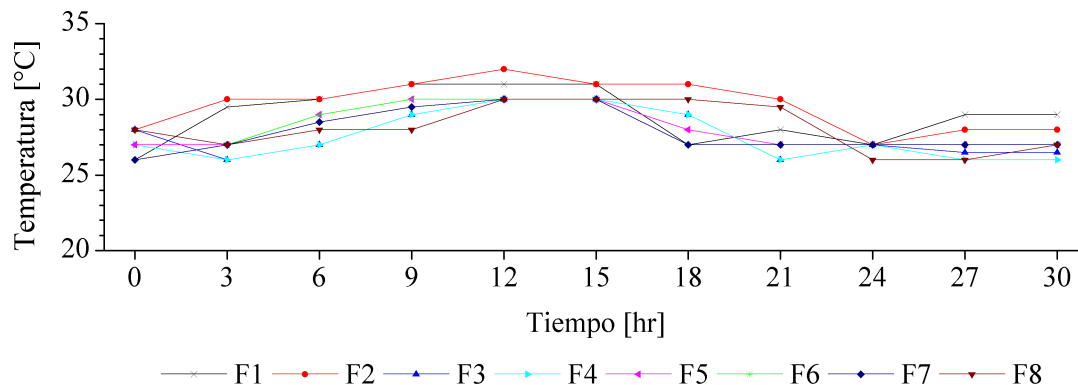


Figura 5.2: Variación temporal de la temperatura para cada fermentación

5.2.2 COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DEL pH

En la Figura 5.3 se muestran los datos correspondientes a la variación del pH con respecto al tiempo. Durante el seguimiento del período de fermentación los tratamientos sin agitación presentaron valores promedios de 4.0 para F3, de 3.9 para F4, F5 y F6 y un valor de 3.7 para F7 y F8, arrojando diferencias significativas menores de 0.3. Los tratamientos con agitación a 150 rpm mostraron valores de pH 4.1 para F1 y de 3.7 para F2, permaneciendo constantes a partir de las 15 horas. Así mismo, se puede notar para los tratamientos sin agitación que a partir de las 30 horas de fermentación, el pH se estabiliza.

Los valores de pH son importantes por su efecto en el crecimiento de los microorganismos. El pH de los mostos de fermentación debe estar entre 3.5 y 5.0 [18]; por lo tanto, los resultados de pH obtenidos se encuentran dentro de lo establecido

en la literatura.

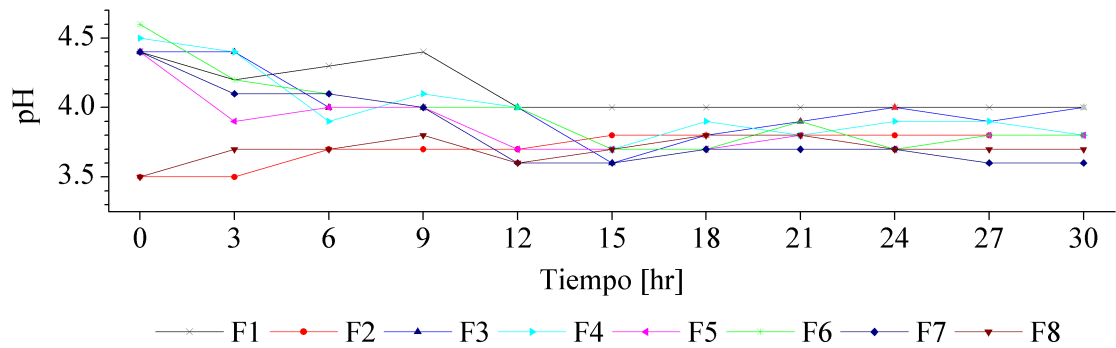


Figura 5.3: Comportamiento experimental de pH

5.2.3 COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE °BRIX

Los resultados obtenidos sobre la reducción de los azúcares con respecto al tiempo se muestran en la Figura 5.4. La variación de los °Brix entre las fermentaciones F1 y F2 con agitación, fue de 8 °Brix, y para las muestras F3 y F4 sin agitación, obtuvieron una diferencia de 7.5 °Brix. Ambas fermentaciones llegaron a obtener una baja concentración de azúcares a partir de las 18 horas. El fermento se inició en 12 °Brix para los cuatro experimentos y se redujo hasta 4.0 para F1 y F2 y 4.5 para F3 y F4.

En las fermentaciones F5, F6, F7 y F8 sin agitación se aumentó la concentración de los azúcares, con el objetivo de elevar los °Brix de los experimentos y por consecuente, obtener mayor concentración de alcohol.

Al realizar las medición de concentración de los azúcares en las muestras, se evidenció una baja concentración a partir de las 30 horas; la fermentación inició con 20 °Brix y se redujo hasta 6 °Brix para las muestras F5 y F6. En las muestras F7 y F8 no se obtuvo la misma reducción en los °Brix, llegando estas hasta los 9 y 8 grados, respectivamente.

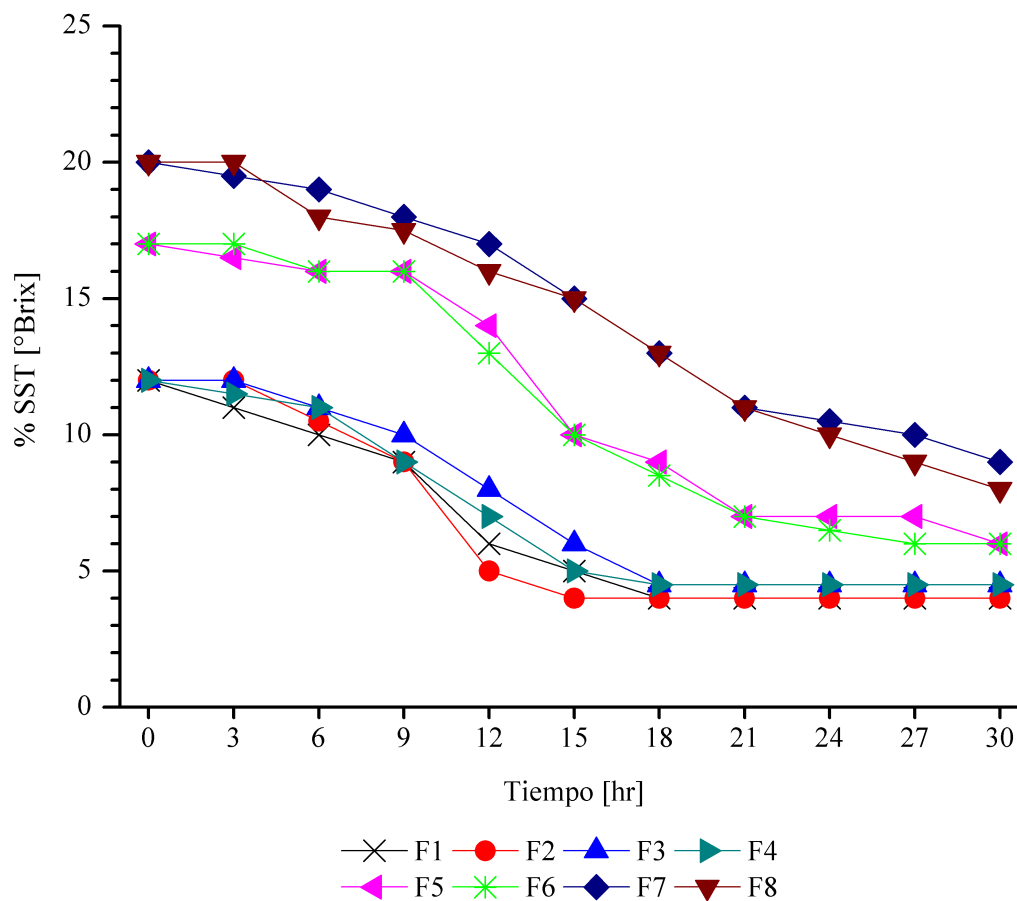


Figura 5.4: Comportamiento experimental de °Brix

Durante la evaluación en el proceso a nivel laboratorio de los parámetros de fermentación del jugo de naranja para la obtención de bioetanol, se obtuvo que la muestra **F8** logró el mayor consumo de azúcares, en las condiciones que se muestran en el cuadro siguiente:

Tabla 5.1: Condiciones óptimas de fermentación (**muestra F8**)

Parámetros	Valor
Temperatura	28
pH	3.7
Concentración de levadura óptima (g/L)	3.0
Agitación rpm	Sin agitación
°Brix	20

Evaluando el tiempo de fermentación en las condiciones de parámetros mencionados en el proceso experimental, se obtuvo un tiempo promedio de fermentación de 30 horas para todas las 8 muestras, siendo la muestra **F8** la que presentó una máxima conversión de azúcares en etanol; esto con base a los valores óptimos para el proceso de fermentación en condiciones ambientales.

5.2.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PRELIMINARES DE LAS MUESTRAS F8, F9 Y F10

5.2.4.1 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA ÓPTIMA MEDIANTE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

En la Figura 5.5 se observa el comportamiento de las mediciones de temperaturas de las muestras F8 en condiciones ambientales y las muestras F9 y F10 en condiciones controladas. En cuanto a las temperaturas con respecto al tiempo de las fermentaciones elaboradas, se puede notar que las temperaturas de fermentación F9 y F10 tienen el mismo comportamiento, manteniendo una temperatura promedio de 29 y 30, respectivamente; sin embargo, la muestra F10 mantuvo una temperatura ligeramente estable a comparación de la muestra F9, y por ende a la muestra F8, puesto que esta se realizó en condiciones ambientales.

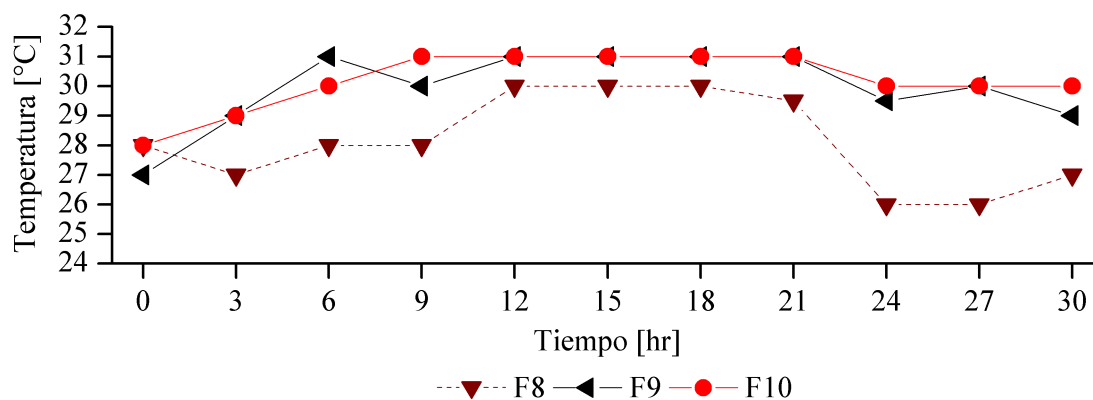


Figura 5.5: Comparación de temperatura de las fermentaciones F8, F9 y F10

5.2.4.2 DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE LA FERMENTACIÓN

En la Figura 5.6 se muestra el comportamiento del pH. Se puede notar que a partir de las 3 horas de fermentación el pH se estabiliza, permaneciendo constante en 3.8 para la muestra F10 con una agitación de 300 rpm. Este valor concuerda con un estudio realizado por Vela *et al* [66] en donde determinan los parámetros óptimos de fermentación, para la producción de bioetanol a partir de jugo de caña.

Por su parte, muestra F9 presenta ligeras variaciones de pH en las primeras horas, llegando a estabilizarse a partir de las 18 horas de fermentación permaneciendo constante en 3.7. Esto, debido a la velocidad de agitación del fermento ya que a mayor velocidad de agitación ayuda a estabilizar el pH. Es por ello, que la muestra F8 en condiciones ambientales tiene variaciones, debido a la no presencia de agitación. Sin embargo, el pH se encuentra dentro de lo establecido por la literatura, manteniéndose constante en 3.7 a partir de las 24 horas de fermentación.

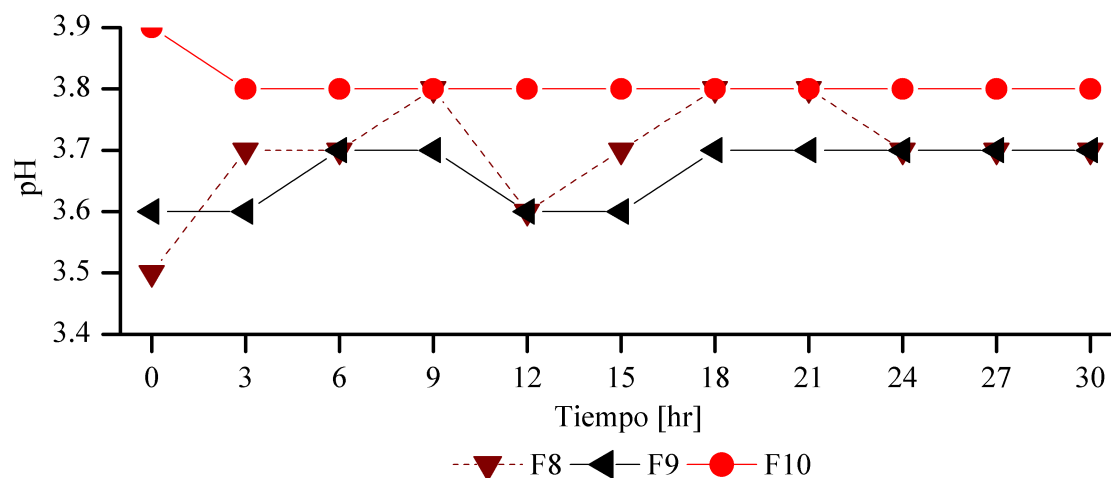


Figura 5.6: Comparación del pH de las fermentaciones F8, F9 y F10

5.2.4.3 CONSUMO DE LOS AZÚCARES EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN

Observando la Figura 5.7, las muestras F8, F9 y F10 presentan las mismas características y obteniendo el mayor consumo de azúcares a partir de las 30 horas de fermentación; sin embargo, las muestras F9 y F10 presentan un comportamiento lineal diferente a la muestra F8, esto es debido a la agitación que se les aplicó a las muestras, ayudando a reducir el consumo de los azúcares de manera progresiva. También se puede observar a 29 °C el consumo de azúcar para la muestra F9 al disminuir la concentración de azúcares totales de 20 a 6 °Brix, para un valor de pH de 3.7. La fermentación F10 a una temperatura de 30 °C se observó una disminución en los °Brix de 20 a 7 °Brix, para un valor de pH de 3.8. Puede notarse que para ambas temperaturas se promovió un consumo rápido del sustrato al principio del proceso. Esto se evidencia en la pendiente que describe la curva del consumo del sustrato.

En la misma Figura 5.7 la muestra F8 la cual corresponde a las dos repeticiones de las muestras F9 y F10, la disminución de los °Brix es ligeramente lenta, ya que esta se realizó en condiciones ambientales.

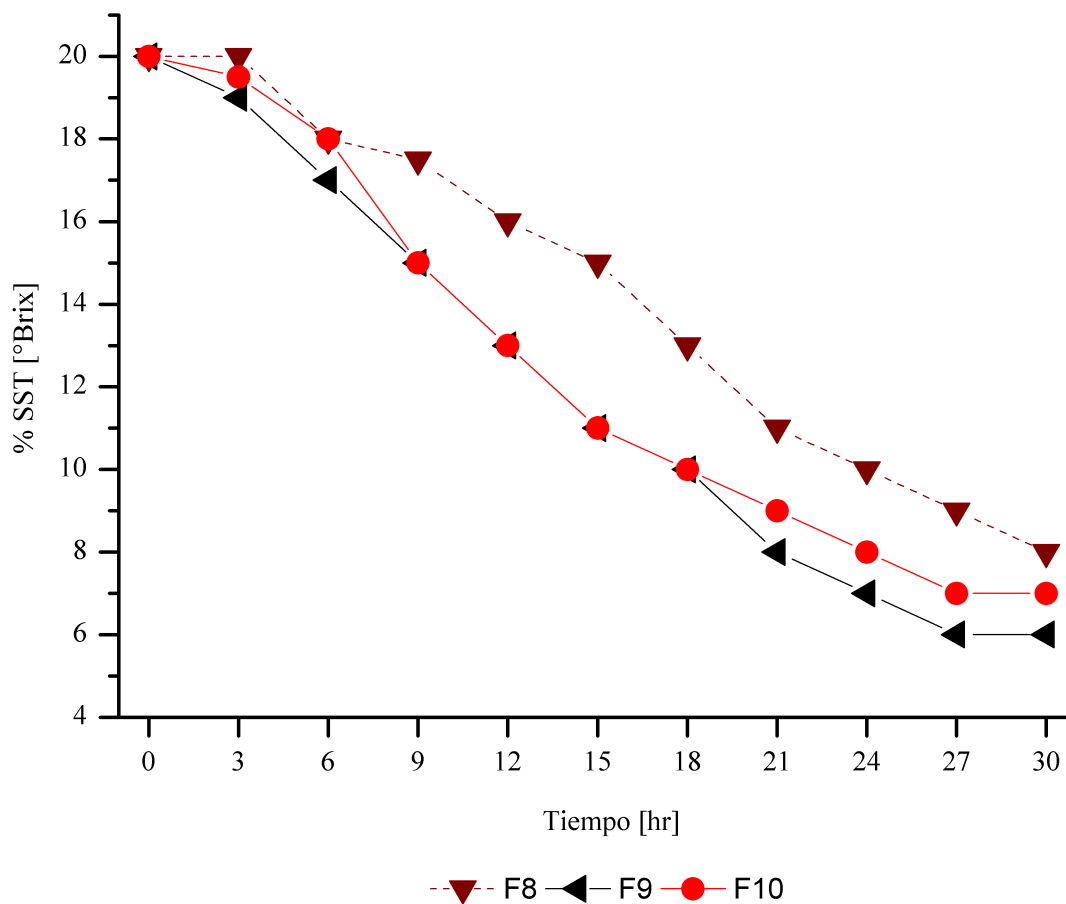


Figura 5.7: Comparación de °Brix de las fermentaciones F8, F9 y F10

Con base en los resultados obtenidos, la muestra F10 obtuvo los parámetros óptimos para llevar a cabo la cinética de fermentación a nivel reactor para la producción de bioetanol, en las condiciones que se muestran en la siguiente Tabla 5.2:

Tabla 5.2: Condiciones óptimas de fermentación (**muestra F10**)

Parámetros	Valor
Temperatura °C	30
pH	3.8
Concentración de levadura óptima (g/L)	3.0
Agitación rpm	300
°Brix	20

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES A NIVEL REACTOR

Se realizó el proceso de fermentación en el reactor híbrido tipo batch, en el cual se tomaron mediciones de temperatura, pH y °Brix. Esto se llevó a cabo cada 3 horas en un tiempo de proceso de 168 horas, ya que en este tiempo la fermentación logra el máximo crecimiento de los microorganismos. De esta manera se percibieron los parámetros cinéticos de las levaduras y su comportamiento con respecto al tiempo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.8.

Los °Brix muestran la cantidad de azúcares disponibles en el medio de fermentación. En la Figura 5.8 se ilustra el comportamiento de los °Brix con respecto al tiempo. El resultado obtenido sobre la reducción de azúcares tuvo una diferencia de 13 °Brix, llegando a obtener una baja concentración en aproximadamente 159 horas. Como se observa en la misma Figura, la fermentación se inició con 20 °Brix y se redujo hasta 7 °Brix. Dicho resultado concuerda con un estudio realizado por Virreira *et al* [26], donde el tiempo de fermentación fue el mismo, manteniéndose constante a partir de las 72 horas desde 10 hasta 3 °Brix, sin agitación. Esto se debe a la activación previa de la levadura antes de ingresar al sustrato y a la adición de nutrientes como: Fosfato de Amonio, Sulfato de Amonio, Sulfato de Zinc, Sulfato de Manganeso y Sulfato de Magnesio, obteniendo como resultado la reducción de los °Brix en un menor tiempo [66].

El pH es un factor importante en la fermentación, debido a que este contribuye en el control de la contaminación bacteriana, en el efecto del crecimiento de los microorganismos, en la velocidad de fermentación y en la formación del alcohol. Según estudios se determinó que el pH favorable para el crecimiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* se encuentra entre 4.5 y 5.0 [67, 18], por lo que fue importante controlar esta variable durante la fermentación para el desarrollo óptimo de la levadura, obteniendo un pH promedio de 4.2, un valor aceptable para el crecimiento de las levaduras y la reducción de los azúcares contenidos en el sustrato.

En la Figura 5.8 se observa que en los diferentes tiempos todos los valores se mantuvieron dentro del pH óptimo de la *Saccharomyces cerevisiae*. Alguna variante en estos datos se debe a factores tales como: humedad relativa, temperatura, error instrumental, error humano en el momento de la medición; los cuales mencionan Giron *et al* [67]. La leve fluctuación del pH durante el proceso fermentativo, se debe a que los metabolitos celulares del microorganismo son liberados al mosto; esto se puede observar en los resultados de la fermentación a nivel reactor, en los cuales el pH oscila entre 4.1, 4.2 y 4.3.

Con respecto a la temperatura, esta se estabilizó a 31 °C, un valor ideal para la reproducción de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, ya que esta crece en un rango de 28 - 32 °C. La temperatura es una de las variables más importantes en el desarrollo de la fermentación, puesto que esta puede afectar la cinética del proceso de fermentación en términos de velocidad del fermento, llegando a producir metabolitos secundarios tales como: ácido acético, ácido láctico, ácido succínico, alcoholes superiores, ésteres volátiles, vinil fenoles, acetoina, diacetilo y 2-3 butanodiol [68].

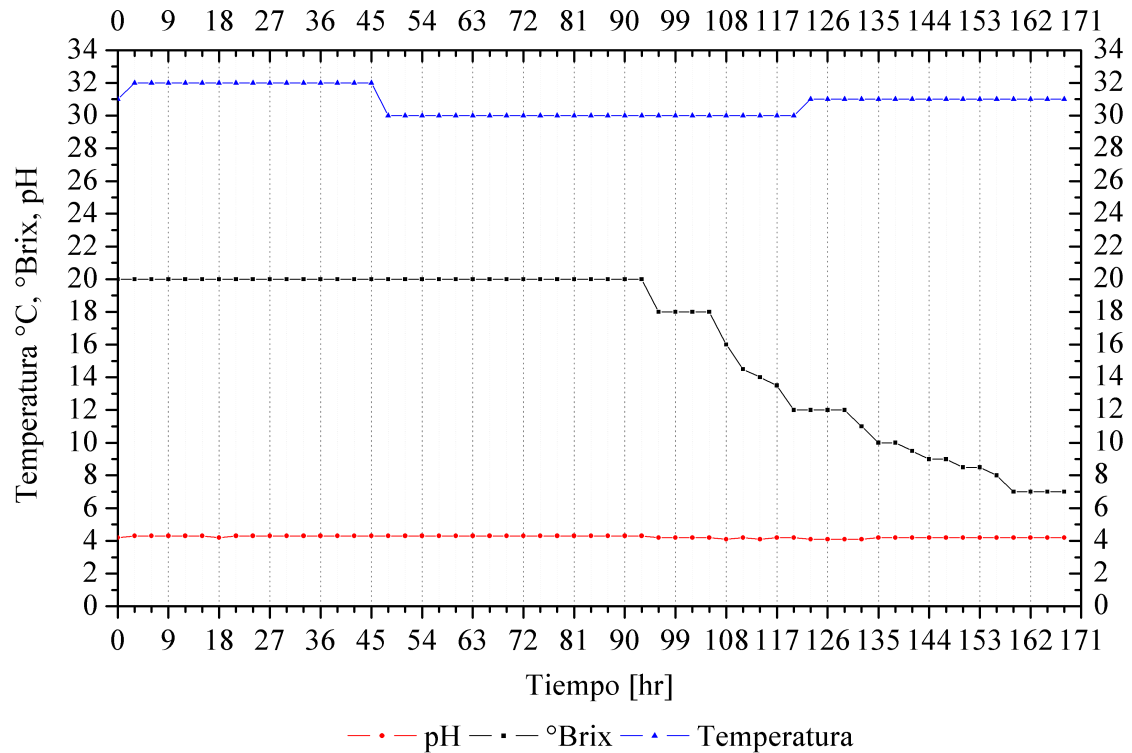


Figura 5.8: Comportamiento experimental de parámetros obtenidos en la fermentación

5.4 DESTILACIÓN A NIVEL REACTOR

El rango de temperatura de destilación representa en qué medida el bioetanol se separa de la muestra acuosa, ya que teóricamente el punto de ebullición del alcohol etílico es de 78.2 °C [67]. Transcurrido el tiempo de fermentación se prosiguió a la destilación del mosto, para ello se incrementó la temperatura de vaporización del bioetanol, bajo este sistema se obtuvo el bioetanol en tres diferentes rangos de temperatura: El primer rango fue de 78 a 80 °C, en el cual se obtuvieron 40 mL de destilado en un tiempo de 7.41 horas. El segundo rango fue entre 80 y 85 °C, en este caso se obtuvieron 158 mL del producto en un tiempo de 7.28 horas. El último rango, que fue de 85 a 90 °C y con un tiempo de 22.25 horas arrojó 935 mL.

Para los tres casos se determinó incrementar los rangos de temperatura una vez que a la salida del condensador no se tenía flujo.

Según Chang [69], en una fermentación alcohólica por cada 2 °Brix se debería obtener un 1.0% de alcohol etílico. En esta investigación de fermentación de jugo de naranja, donde se obtuvo un valor inicial de 20 °Brix, se tendría una producción de etanol técnicamente el 10%. Sin embargo en la Tabla 5.3 se muestra el rendimiento del bioetanol obtenido aproximadamente del 3%, encontrándose por debajo de los valores teóricos respecto a lo citado. Obteniendo una conversión de 1.1 litros. Esta baja eficiencia en la destilación fue principalmente a la falta de agitación y la distribución homogénea de calor en la fermentación.

Tabla 5.3: Rendimiento obtenido de bioetanol

Jugo de naranja natural	Bioetanol
50 litros	1.1

5.5 ANÁLISIS DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL BIOETANOL

Se realizó el análisis de energía que se consumió en el reactor tipo batch para la obtención del bioetanol, esto para conocer la energía obtenida y la consumida por los equipos en la producción de este biocombustible; se muestra dicho análisis en las Tablas 5.4 y 5.5.

Tabla 5.4: Energía consumida en el reactor híbrido

Cargas del reactor	Tiempo de uso [h]	Consumo [kwh]	Consumo total [MJ]
Resistencia	205.34	2	1478.52
Compresor	168	1.26	762.12
Bomba sumergible	37.34	0.22	29.52
Instrumentación	205.34	0.0016	1.188
Sistema de computo	205.34	0.13	96.12
Energía consumida	-	-	2,367.468

Tabla 5.5: Energía final obtenida

Jugo Fermentado [L]	Bioetanol obtenido [L]	Energía obtenida [MJ]
50	1.1	23.91

Como resultado de la energía consumida por los equipos del reactor, se obtuvo un consumo mayor con respecto a la energía producida (bioetanol). Cabe mencionar que este análisis considera únicamente la energía requerida en el proceso de fermentación y destilación durante la producción del alcohol etílico; sin embargo, para un análisis de todo el ciclo de vida de la producción habría que tomar en cuenta los gastos energéticos del cultivo, transporte, entre otros.

Hoy en día, el proceso de producción de bioetanol resulta económicamente más costoso que el proceso de gasolina obtenida de los productos petrolíferos, ya que el bioetanol se realiza a partir de cultivos tradicionales para la producción alimentaria, es por esto que su costo es superior. Para lograr una rentabilidad del bioetanol es necesario contar con subvenciones que aminoren el costo de la materia prima o buscar materias primas más económicas que las tradicionales [70].

Luo *et al* [71] mencionan que existen resultados de investigación para el análisis y evolución del ciclo de vida, los cuales son resultados positivos para la producción de bioetanol a partir de jugo de caña de azúcar.

5.6 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BIOETANOL

5.6.1 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico inferior (PCI), que se determinó con base en el método de prueba de la norma ASTM D240 [53] mostrado en la sección 3.2, es una propiedad importante ya que es la cantidad total de calor desprendido por la combustión completa de una sustancia. Esto se evalúa midiendo el efecto de reducción en la duración de la primera fase de la combustión [63]. En la Figura 5.9 se muestra la comparación de los poderes caloríficos del bioetanol, obtenidos en el reactor a diferentes temperaturas. Estas mismas muestras fueron sometidas a una segunda destilación a nivel laboratorio, a una temperatura controlada de 78 °C, con el objetivo de obtener una mayor pureza del bioetanol.

En la Figura 5.9 se observan las tres distintas temperaturas E-78, E-85 y E-90 °C, comparado con un trabajo previo y con un alcohol etílico anhidro de laboratorio. Generalmente el valor del PCI varía dependiendo en el contenido de agua que poseen. En el [Apéndice A.14], se muestran las curvas de liberación de calor de los poderes caloríficos .

El valor del poder calorífico obtenido en la presente investigación con base en el método de prueba ASTM D240 [53] es de 26,235.42 kJ/kg para la destilación E-78 °C, de 26,183.72 para E-85 y para E-90 un valor de 25,972.25, el cual comparando la muestra E-78 °C es igual con el valor obtenido por Zumalacárregui-De [72], donde utilizó bagazo de caña de azúcar como materia prima para la producción de bioetanol; sin embargo es menor que el poder calorífico del laboratorio, esto debido al distinto método de destilación y por ende al porcentaje de agua.

Un valor menor de poder calorífico del bioetanol frente a la gasolina implica

una ligera pérdida de potencia en el motor, pero ello se compensa con un mayor rendimiento debido a la molécula de etanol que contiene mas oxígeno que la gasolina y esto mejora la combustión [73].

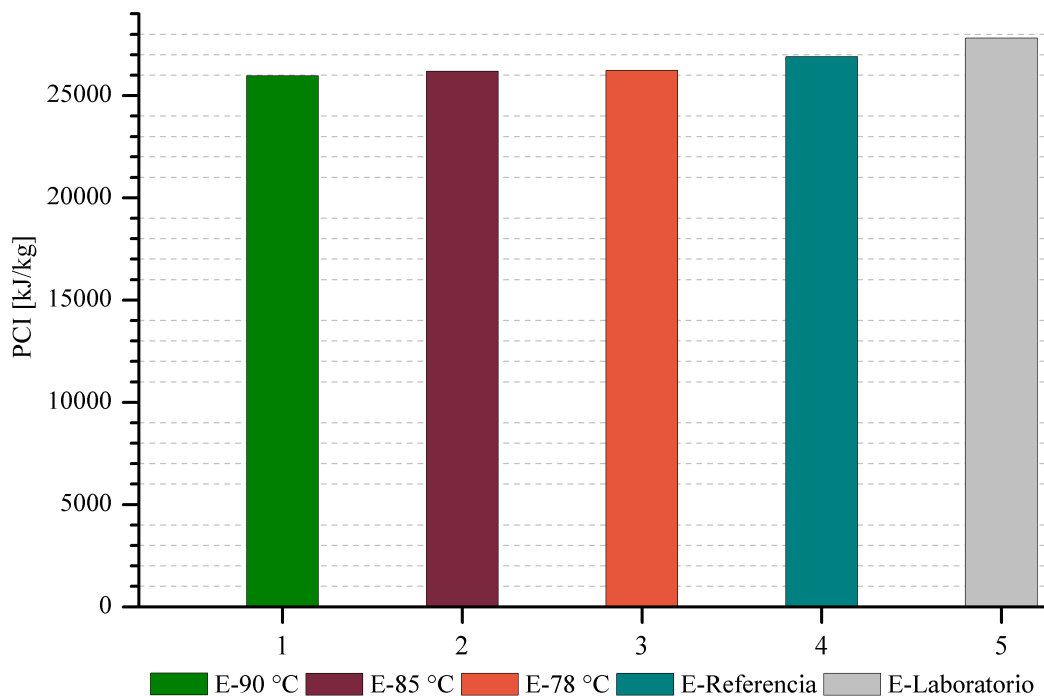


Figura 5.9: Comparación del poder calorífico

5.6.2 DENSIDAD A 25 °C

La densidad del bioetanol se determinó de acuerdo al método plateado en la sección 3.3. El valor del bioetanol obtenido en el reactor a 78 °C con una segunda destilación es de 0.83 g/mL. En la Figura 5.10 se muestra la comparación de la densidad de 2 bioetanol y un etanol absoluto, donde se observa que el valor de la densidad para el bioetanol elaborado en el reactor y de referencia (0.81 g/mL) poseen un valor similar, esto es debido al proceso de fermentación de origen vegetal (bioetanol) que se obtienen por mostos azucarados, dando lugar a un alcohol etílico con grado de alcohol variable entre 10 y 15 %, obteniendo un alcohol hidratado con un porcentaje de agua de 4-5 % [70]. Este valor de densidad es diferente al del etanol

absoluto de laboratorio que posee un valor ligeramente menor, de 0.79 g/mL.

Con base en el resultado de la densidad del bioetanol elaborado en el reactor tipo batch, puede decirse que este es un alcohol etílico anhidro, ya que cumple con la característica de la calidad del combustible, estando ligeramente por encima del etanol absoluto, con lo cual se asegura que la densidad no sera un factor influyente en la calidad del combustible y sus propiedades de combustión, presentando beneficios como eliminación de residuos, los cuales pueden ser contaminantes [74].

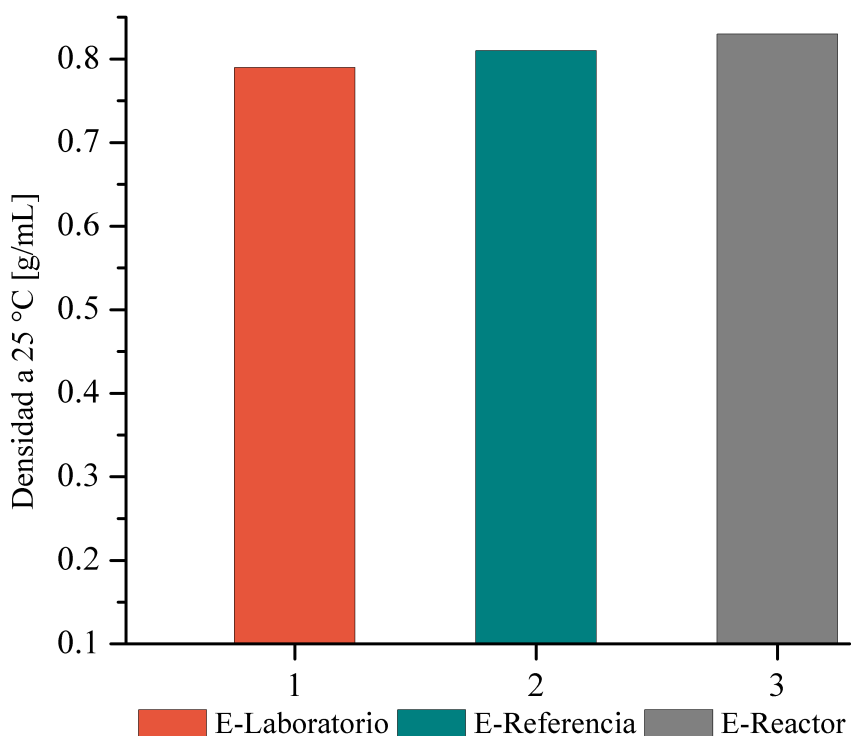


Figura 5.10: Comparación de la densidad

5.6.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL BIOETANOL

El resultado de la concentración de pureza del bioetanol se obtuvieron mediante la técnica de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas mediante el método planteado en la sección 3.4. La CG-MS es una técnica que tiene la cualidad de realizar la separación de mezclas muy complejas e incluso es capaz de cuantificar

los componentes individuales de la muestra.

Con base a la destilación realizada a nivel reactor se obtuvo un bioetanol con un porcentaje de agua del 40 % , debido a esto no era posible medir directamente en el cromatógrafo de gases (CG). Por esto, se realizó una segunda destilación a nivel laboratorio a 78 °C. A continuación se exponen los resultados obtenidos en la cromatografía de gases mediante dos métodos.

1) Método de CG del etanol absoluto de laboratorio

Para realizar el cálculo de la pureza del bioetanol producido en el reactor híbrido tipo batch, se obtuvo el área bajo la curva de la cromatografía del etanol absoluto, con el fin de tener un patrón de referencia. Como puede verse en la Figura 5.11, el cromatógrama del etanol absoluto se presentan dos picos, el primero de mayor tamaño corresponde al etanol y el segundo correspondiente al solvente (tolueno) con un tiempo de retención de 0.684 minutos y 1.244 minutos, respectivamente.

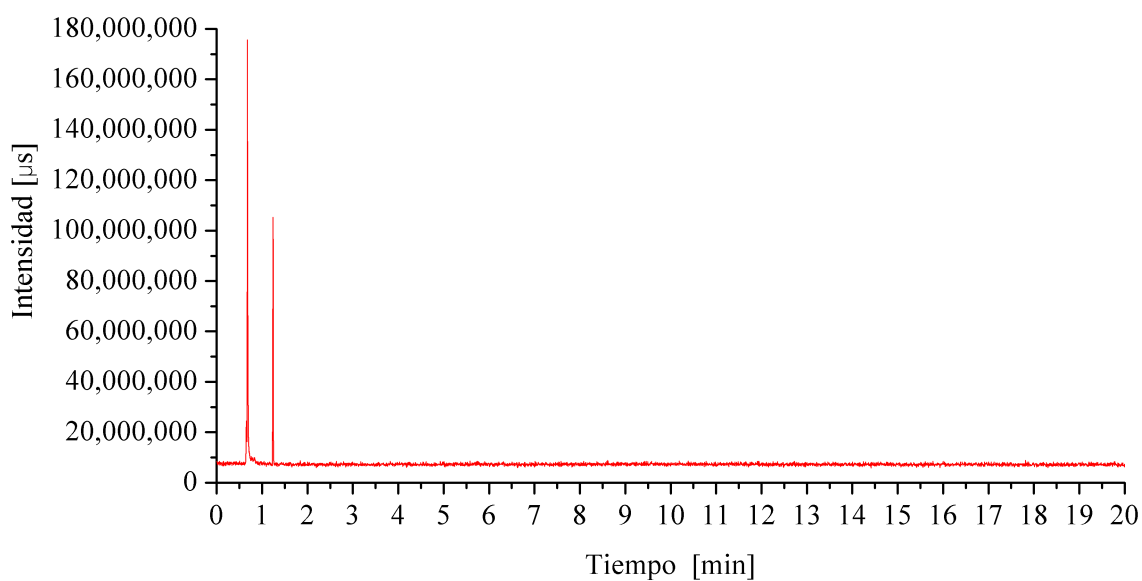


Figura 5.11: Tiempos de retención de la cromatografía de gases del etanol absoluto de laboratorio y tolueno

2) Método de CG del bioetanol producido en el reactor

En la Figura 5.12, se muestra el análisis de la cromatografía para el bioetanol, en el cual se determina que el bioetanol eluye en un tiempo de retención de 4.92 minutos. Así mismo se puede asegurar que el pico observado corresponde al limoneno, siendo una sustancia natural de fórmula molecular $C_{10}H_{16}$. Este componente normalmente se considera mayoritario en las cáscaras de los cítricos como la naranja, además es el que le da el olor característicos de los mismos [75].

También se hacen presentes otros componentes en concentraciones muy bajas como se muestra en la Figura 5.12.

- CYCLOHEXENE,1-METHYL-5-CI-METHYLETHENYL
- CYCLOHEXENE,4-ETHENYL-1,4-DIMETHYL
- 1,5-CYCLOOCTADIENE,1,5-DIMETHYL

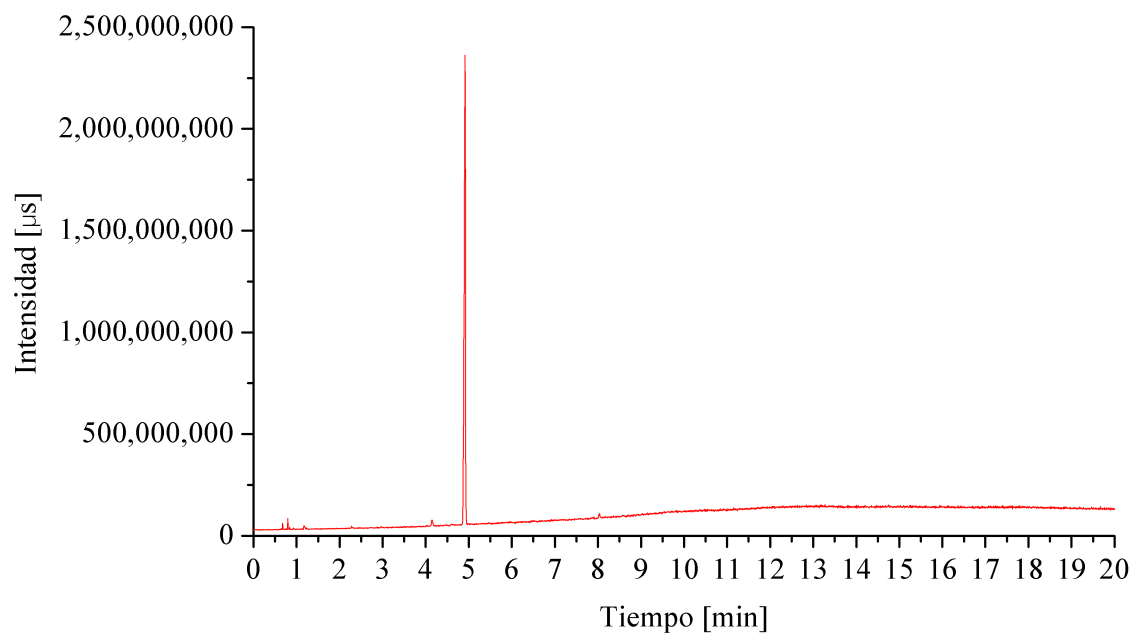


Figura 5.12: Tiempos de retención de la cromatografía de gases del bioetanol producido en el reactor

En los apéndices A.19 y A.20 se muestran las cromatografías de la muestras

analizadas, en donde se observan los tiempos de retención de los compuestos inyectados.

En la tabla 5.6 y 5.7 se resumen los resultados de la cromatografía de gases realizada para la determinación de la pureza, en la cual se observan los tiempos de retención de cada uno de los compuestos (etanol, tolueno y limoneno).

Para el cálculo de la pureza se realizaron tres inyecciones en el cromatógrafo; una muestra del etanol absoluto, otra del bioetanol del reactor y una mezcla de ambos alcoholes. Los porcentajes de los componentes para cada una de las muestra se calculan dividiendo el área de cada componente entre el área total y multiplicado por el 100 %. Enseguida los porcentajes de áreas calculadas se multiplican con el 0.5 % como se muestra en la Tabla 5.7. Finalmente, se obtiene la pureza multiplicando el porcentaje de la mezcla (etanol absoluto y bioetanol del reactor) con el 100 % y dividiendo entre la suma de las áreas calculadas.

Tabla 5.6: Resultados de la cromatografía de gases

Compuesto	Tiempo de retención	% de área bajo la curva		
		Patrón (etanol absoluto)	Bioetanol reactor	50/50 %
Etanol	0.684	69.802	1.486	8.687
Tolueno	1.244	30.197	0.352	2.963
Limoneno	4.925		95.182	

Tabla 5.7: Cromatografía de gases (% de pureza)

Compuesto	Patrón (etanol absoluto)	Bioetanol reactor	50/50 %	% área bajo la curva
				% pureza
Etanol	69.802	80.840	74.562	
Tolueno	30.197	19.159	25.437	98.992
Limoneno				

El alcohol producido de la fermentación a partir de jugo de naranja por medio de la levadura *saccharomyces cerevisiae*, se obtuvo una pureza del **98.99 %** con un porcentaje de agua de **1 %** como se observa en la Tabla 5.7.

5.7 PRESIÓN MÁXIMA PROMEDIO EN CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Una vez obtenido el bioetanol con la pureza suficiente en el reactor híbrido tipo batch, se procedió a realizar mezclas con gasolina con el fin de inyectarlas en el motor tipo CFR, con el objetivo de validar la calidad de dicho biocombustible en el motor.

En el gráfico a continuación se muestra la dispersión de la presión en cámara durante los 100 ciclos de combustión. Además en la Figura 5.13 se observa el comportamiento promedio de las curvas de presión en cámara durante los ciclos de combustión para el ensayo realizado con el combustible de referencia G100 a 38 °C y RC=4.6.

Con base en los resultados de presión en cámara, se obtienen el comportamiento durante la combustión, que son objeto de estudio de esta investigación, duración de la primera fase de la combustión y presencia e intensidad de autoignición.

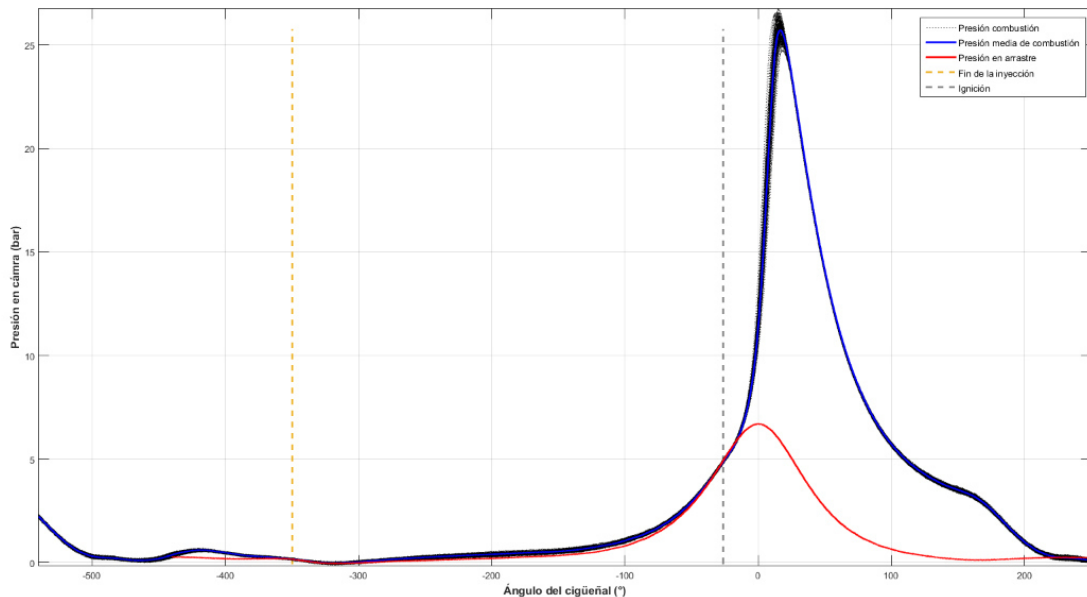


Figura 5.13: Obtención de la curva de presión en cámara promedio a partir de 100 curvas de combustión

En la Figura 5.14 a), se muestran los resultados obtenidos de presión máxima promedio en cámara, de los 100 ciclos de combustión analizados en función de dos relaciones de compresión (4.6 y 7.36) para las mezclas E5 y E10 a una temperatura de admisión de 38 °C, como lo establece por la norma D2700 [59]. En las Figuras 5.14 b) y 5.14 c) se muestran los mismos resultados con diferentes temperaturas 60 y 70 °C, respectivamente, lo anterior en comparación con el combustible de referencia G100.

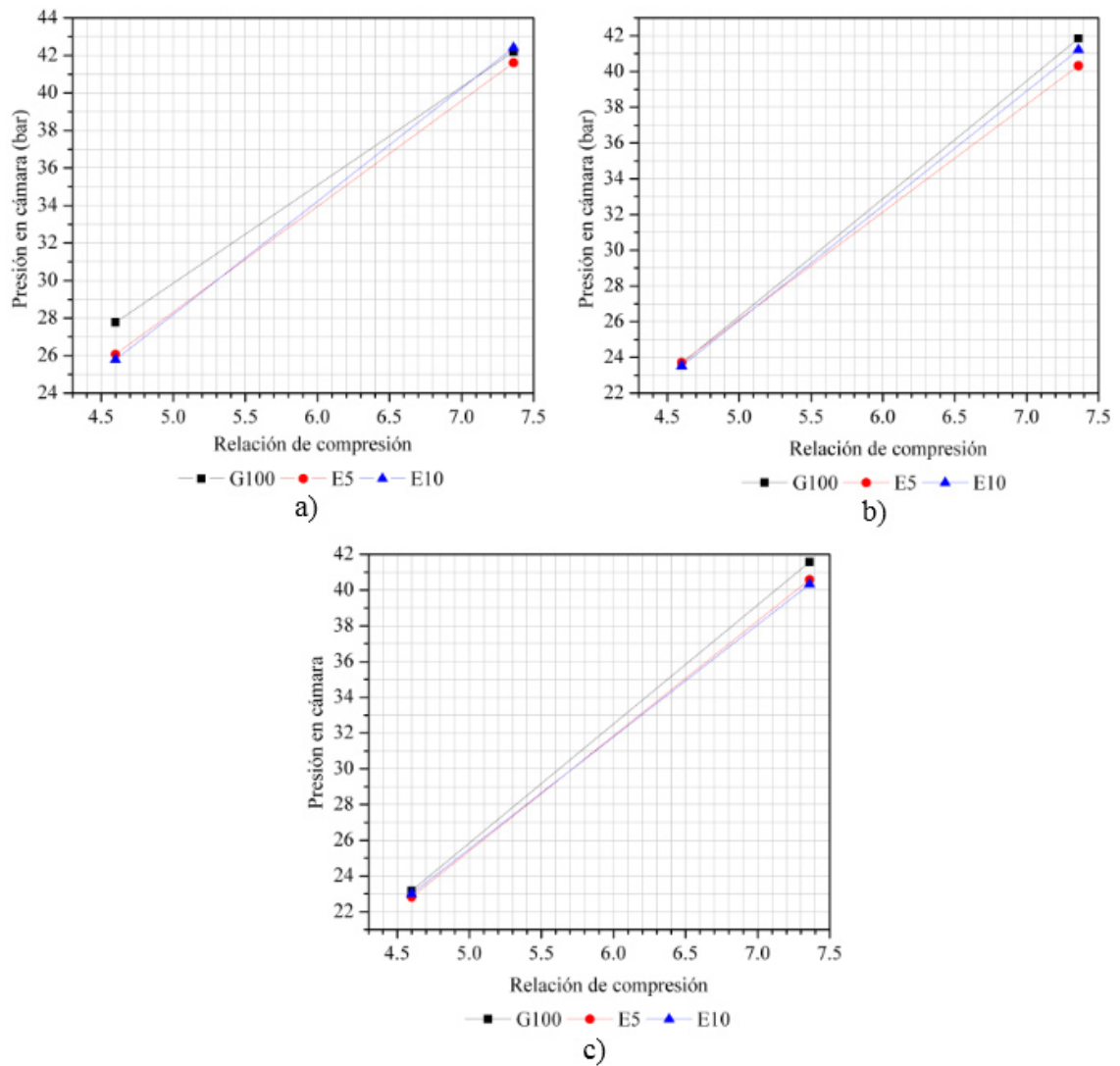


Figura 5.14: Presión máxima promedio para gasolina y mezclas con bioetanol

Al observar los resultados, se evidencia como el valor mayor alcanzado de la

presión máxima promedio aumenta notablemente a relaciones de compresiones altas, que a su vez representan las RC en los autos comerciales, donde la presión en cámara media es muy similar. Comparando las presiones de las mezclas E5 y E10 con las de la gasolina de referencia G100, estas son ligeramente menor. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Rubio 2018 [63].

La presión máxima de ambas mezclas del E5 y E10 son semejante a la de la gasolina, esto es producto de la reducción del poder calorífico del bioetanol comparado con la gasolina sin embargo su influencia es compensada por la reducción de la primera fase de la combustión, como se muestra en la sección 5.8.

5.8 DURACIÓN DE LA PRIMERA FASE DE LA COMBUSTIÓN

En la Figura 5.15 se muestra el valor en la duración de la primera fase de la combustión (DPFC) para las 2 mezclas y las dos relación de compresión, en comparación con el combustible de referencia. El principal parámetro que interviene en la DPFC es la relación de compresión. Para valores de RC altas se favorece a una primera fase de combustión más rápida [63, 76]. En general, la adición de alcohol (bioetanol) al 5% y 10% a una temperatura de admisión de a) 30, b) 60 y c) 70 °C favorece que la primera fase de la combustión sea rápida para un valor de compresión de 7.36. Comparando estos resultados con el combustible de referencia G100 se registra una DPFC mayor para ambas mezclas en relaciones de compresión menores a 7.36.

Cabe recalcar que para ninguna mezcla se observa una influencia clara de la relación de compresión en la disminución de la primera fase de la combustión. La variación observada con respecto al combustible de referencia depende principalmente de la pureza del bioetanol y la proporción.

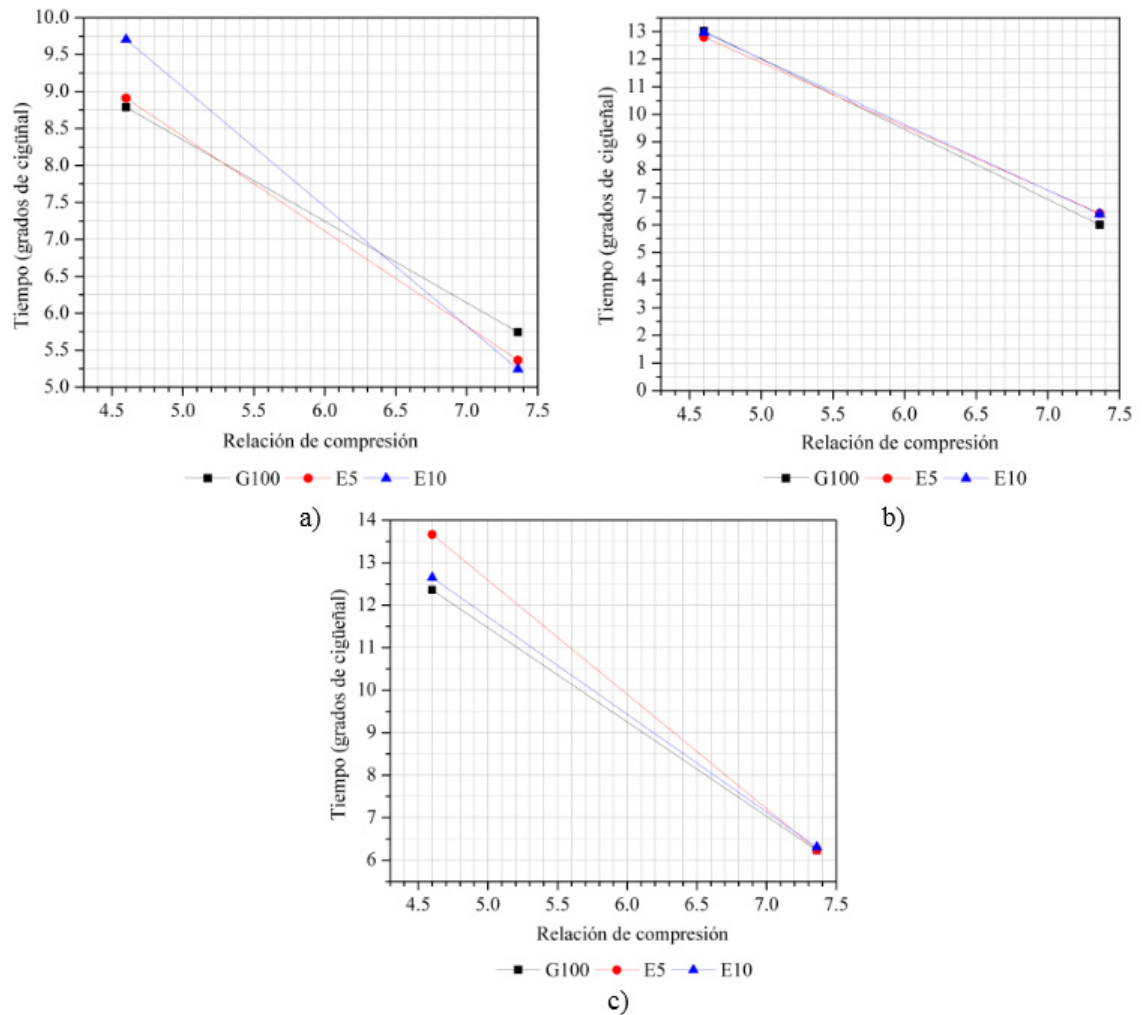


Figura 5.15: Duración de la primera fase de combustión para las mezclas gasolina-bioetanol

5.9 PRESENCIA INTENSIDAD DE AUTOIGNICIÓN

En la Figura 5.16 a), b) y c) se muestra la intensidad de autoignición promedio con las mezclas E5 y E10 a dos relación de compresión 4.6 y 7.36, en comparación con el combustible de referencia G100.

Para evaluar el comportamiento ante la autoignición (AI) de un combustible, se evalúan dos parámetros: la intensidad de AI para cada ciclo y su promedio a lo

largo de los 100 ciclos de combustión y la probabilidad de AI, la cual se define como el porcentaje de ciclos que presentaron una intensidad de autoignición superior a 50 kpa [63].

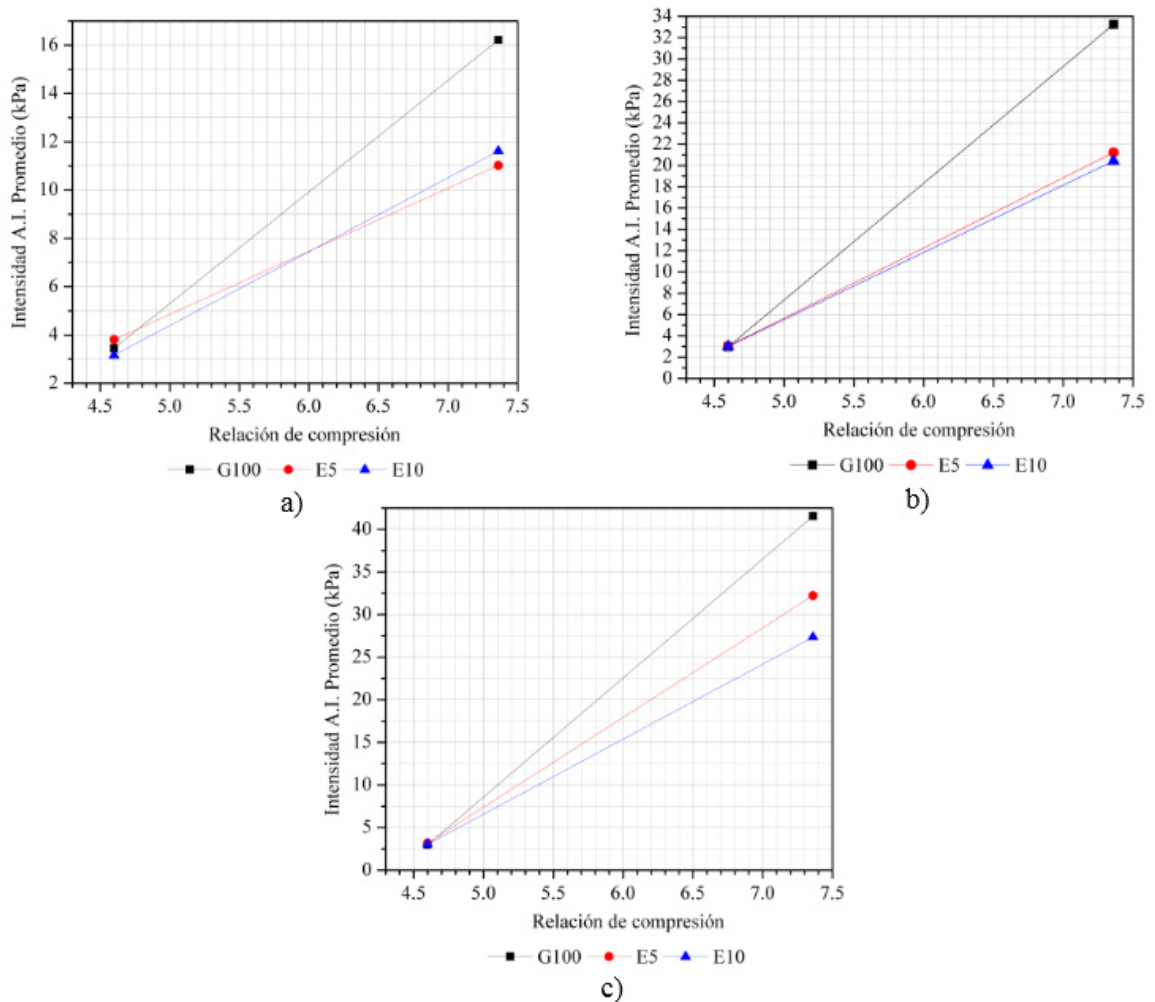


Figura 5.16: Intensidad de autoignición promedio a las mezclas gasolina-bioetanol

Observando la Figura 5.16 la intensidad de autoignición, esta influenciada por la relación de compresión a la que opera la cámara de combustión. Cuando el motor se encuentra en una relación de compresión alta las condiciones termodinámicas durante el punto muerto superior son tales que el combustible que permanece sin quemarse en el cilindro, ve favorecida su oxidación antes de ser alcanzada por el frente de llamas generada por la bujía lo que provoca un choque de ondas de presión

[63, 77].

En lo que respecta a la proporción de alcohol en la mezcla con la gasolina, se observa que a medida que aumenta la proporción de bioetanol disminuye la autoignición para ambas relaciones de compresión y las tres temperaturas de trabajo con excepción de la temperatura a) 38 °C donde se obtiene menor autoignición con la mezcla E5.

Con base a los resultados obtenidos de la AI se puede concluir que las proporciones de etanol en 5% y 10% son favorables para la disminución del knock, ya que permite al motor opere sin problemas para las dos relaciones de compresión evaluadas, disminuyendo la pérdida de potencia y riesgo para el motor, pese a observarse valores de autoignición superiores a 0 kPa. Estos resultados son similares por un trabajo previo realizado por Rubio 2018 [63] en donde obtuvo valores inferiores a 20 kPa para mezclas E5 y E10.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones formuladas con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, así como los trabajos futuros que se proponen para continuar la línea de investigación de este trabajo.

6.1 CONCLUSIONES

Con base en el presente trabajo y como segunda parte del reactor híbrido tipo batch para la producción de biodiésel y bioetanol. Se logró de forma exitosa la puesta a punto del reactor con capacidad de 60 litros, así como la producción de bioetanol, con ello se cumplen los objetivos planteados al inicio de la investigación logrando destacar lo siguiente:

- La ampliación de las capacidades y flexibilidad del reactor híbrido tipo batch para la producción de bioetanol, que es de gran beneficio para el grupo de investigación del GETR (Grupo de Investigación de Energías Térmicas y Renovables) ya que se crea una cadena que inicia desde la producción del biocombustible, caracterización, la inyección y la combustión de este biocombustible en motores a gasolina.
- Se desarrolló una metodología apropiada para llevar a cabo el proceso de fermentación y destilación a nivel laboratorio y reactor, para la producción de bioetanol a partir del jugo de naranja.
- Por medio de la fermentación a nivel laboratorio se obtuvieron los parámetros para realizar la fermentación a escala reactor.
- En el reactor se lograron monitorear los parámetros establecidos para el proceso de fermentación tales como: °Brix, pH y temperatura. Dichos parámetros se monitorearon cada 3 horas, obteniendo como resultado valores aceptables como: 7 °Brix finales, pH de 4.2 y temperatura promedio de 31 °C.
- En el tanque principal del reactor se pueden establecer las condiciones para un proceso fermentativo y observar la cinética de crecimiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en sus diferentes fases de metabolización de los azúcares.

- Al evaluar el tiempo de fermentación del jugo de naranja para la obtención del bioetanol, se determinó que el tiempo promedio fue de 159 horas, esto debido a la no activación de la levadura *Saccharomyce cerevisiae* y a la adicción de nutrientes como: Fosfato de Amonio, Sulfato de Amonio, Sulfato de Zinc, Sulfato de Manganeso y Sulfato de magnesio.
- Durante el proceso de destilación del alcohol, se logró mantener el control de la temperatura para la evaporación del bioetanol. Logrando obtener el bioetanol en estado líquido; sin embargo, no se pudo obtener el rendimiento esperado de acuerdo a lo indicado en la literatura, 10 % de todo el fermento. Obteniendo así, solo el 3 % del producto destilado.
- El método de fermentación alcohólica en las condiciones de experimentación planteadas con la levadura *Saccharomyce cerevisiae* sin ser activada y sin la adición de nutrientes, es de fácil implementación pero de bajo rendimiento.
- El poder calorífico, en el cual se obtuvo un valor de 26,235.42 kJ/kg, el cual es un alcohol etílico hidratado aceptable, con lo que se garantiza un mayor rendimiento y mejora en la combustión de un motor a gasolina.
- El valor de la densidad a 25 °C cumple con la característica de un bioetanol hidratado, cuyo valor es ligeramente superior al etanol absoluto. Con lo cual se asegura que la densidad no será influyente en la calidad de la combustión.
- La cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas, es una técnica muy útil que tiene la cualidad de realizar la separación de mezclas y cuantificación de componentes individuales de cualquier combustible. Con base en esta técnica se pudo determinar la pureza del bioetanol obtenido a nivel reactor llegando a obtener una pureza del 98.99 %.
- Los resultados obtenidos de la pureza del bioetanol con base a la cromatografía fueron favorables, ya que se obtuvo un valor cercano al de un alcohol etílico absoluto que tiene como porcentaje de pureza de 99.7 %, obteniendo una diferencia de 0.71 % de pureza entre ambos alcoholes.

- El mayor valor alcanzado de presión máxima promedio, aumenta notablemente a relaciones de compresiones altas. El uso de mezclas del 5% y 10% de bioetanol muestran poca variación con respecto a la gasolina de referencia G100.
- El parámetro que interviene en la duración de la primera fase de combustión es la relación de compresión, favoreciendo a una DPFC más rápida para valores de RC altos. La adición de alcohol al 5% y 10% para las tres temperaturas de trabajo favorece que la DPFC sea rápida para un valor de RC de 7.36, pero siendo ligeramente mayor para la RC de 4.6 con respecto al combustible de referencia.
- La intensidad de autoignición esta fuertemente relacionada con la relación de compresión, a medida que se aumenta la RC lo hace la presencia e intensidad de autoignición. El bioetanol mezclado con la gasolina muestra la capacidad de reducir extraordinariamente la intensidad de autoignición.
- De todo lo anterior, el bioetanol puede considerarse como una energía del futuro ya que permite la reducción de combustibles de origen fósiles, así como como la reducción de gases contaminantes al ser usado en mezcla con gasolina, presentando ventajas en motores de encendido provocado como: la DPFC sea mas rápida y la reducción de la AI.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros de la presente investigación, se plantean las siguientes actividades:

- En el trabajo realizado, se llegó a la producción de bioetanol a partir de jugo de naranja, por lo tanto se propone realizar la fermentación con diferentes levaduras comerciales o microorganismos tales como: *Zimomonas*, *Asperguillus*,

Cándida, entre otros. A partir de diferentes materias primas agrícolas con un alto contenido de azúcar: jugo de caña de azúcar y sorgo dulce.

- En el proceso de destilación se requiere un estudio detallado para el sistema de calentamiento ideal para la evaporación del alcohol, así garantizar un producto de alta pureza. Para ello es necesario instalar una columna de destilación fraccionada.
- En el tanque principal es necesario instalar un motor-reductor, ya que es uno de los principales componentes para la agitación.
- Instalar termopares tipo K para medir la temperatura en distintos puntos del tanque, así poder tener un mejor control de la temperatura. Al mismo tiempo instalar un enchaquetado, ya que mediante la circulación de un fluido permite mantener una temperatura estable y uniforme dentro del tanque principal.
- Adicionar un medidor de oxígeno disuelto para contemplar la reacción biológica que genera sobre los microorganismos. Así mismo, instalar un sensor de pH de procesos con un rango de temperatura de 0 a 130 °C y pH de 0-14.
- En el presente trabajo, se estudió el bioetanol producido en el reactor híbrido tipo batch en mezclas con gasolina con proporciones bajas. Sería interesante continuar el estudio elevando la proporción de alcohol de alta pureza, la relación de compresión, para observar la influencia de concentraciones elevadas de este combustible.

APÉNDICE A

ANEXOS

A.1 DIMENSIONES DE LOS TANQUES DE SOLUCIÓN ÁCIDA Y BASE

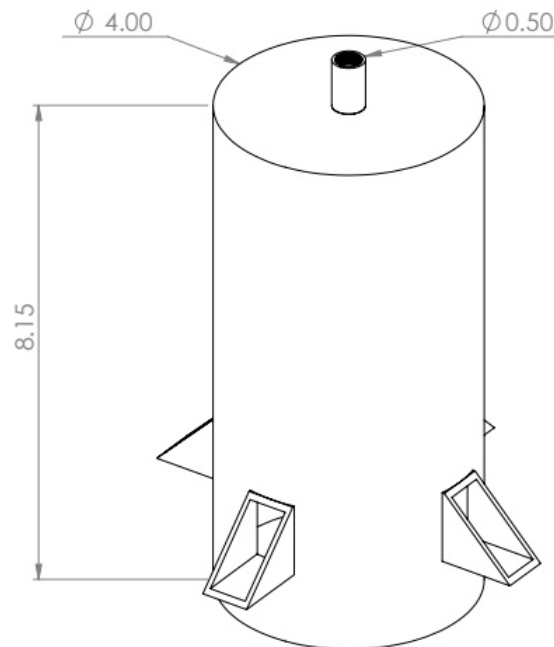


Figura A.1: Dimensiones de los tanques de solución ácida y base

A.2 BRIDA ACOPLADA A LA SUPERIOR DEL REACTOR

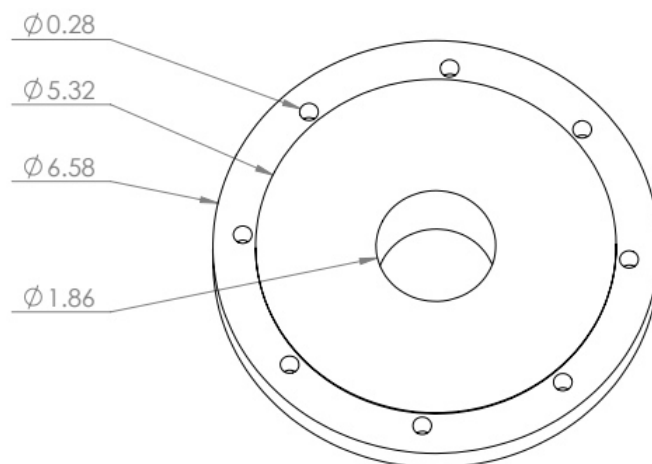


Figura A.2: Dimensiones de la brida

A.3 BRIDA ACOPLADA A LA PARTE SUPERIOR DEL CONDENSADOR

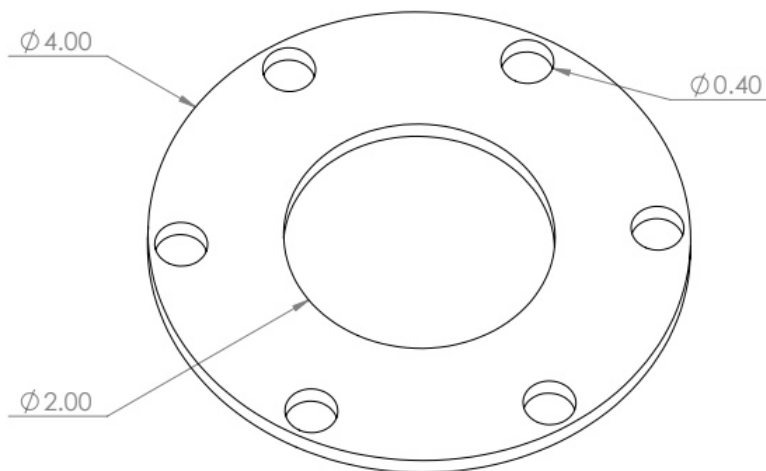


Figura A.3: Dimensiones de la brida

A.4 TUBO PARA LA SALIDA DEL VAPOR

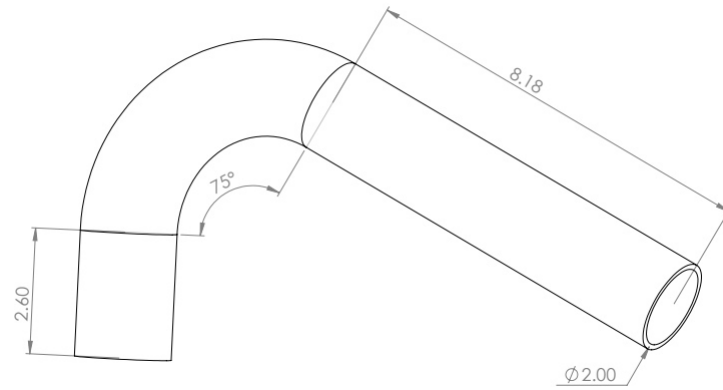


Figura A.4: Dimensiones del tubo para la salida del vapor

A.5 SERPENTÍN

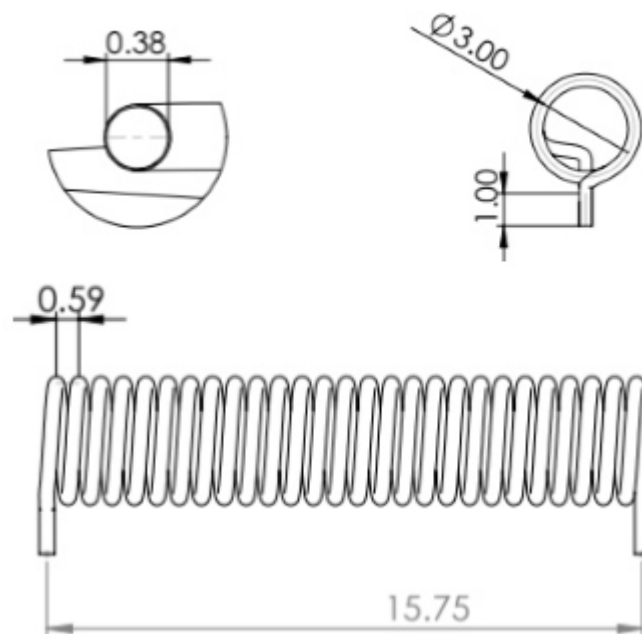


Figura A.5: Dimensiones del serpentín

A.6 CARCAZA DEL CONDENSADOR

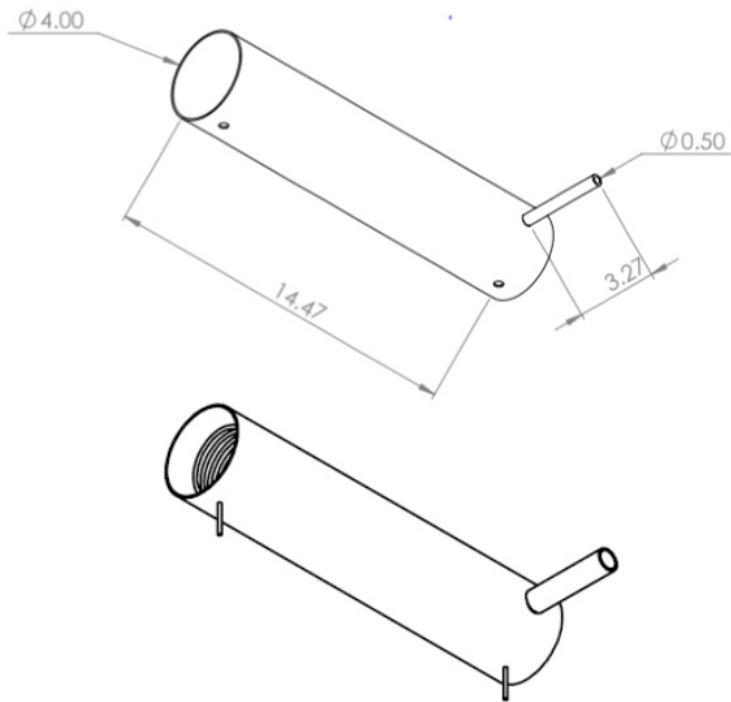


Figura A.6: Dimensiones de la carcasa del condensador

A.7 PLANO DEL CONDENSADOR

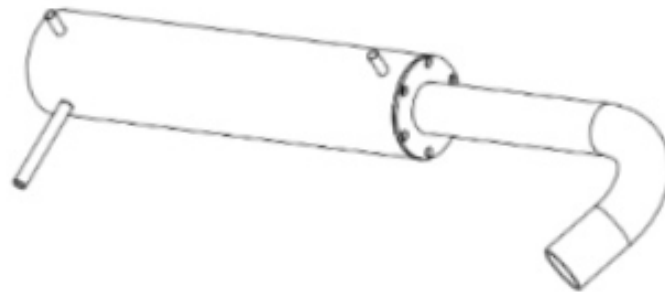


Figura A.7: Diagrama esquemático del prototipo

A.8 ESTRUCTURA PARA LOS TANQUES DE LA SOLUCIÓN ÁCIDA Y BASE

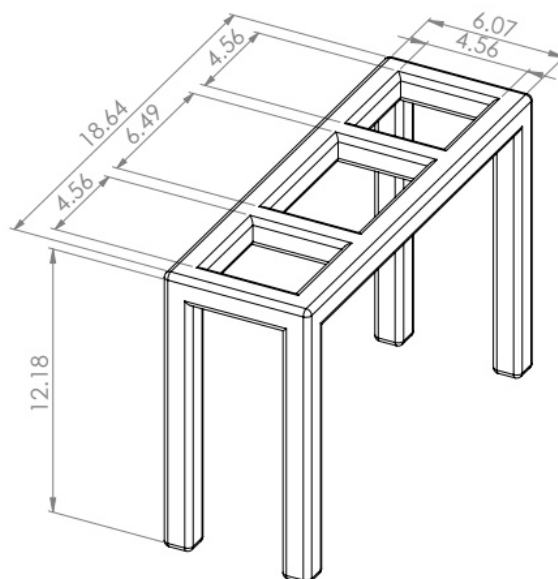


Figura A.8: Dimensiones de la estructura para los tanques de las soluciones

A.9 PIEZA PARA EL POTENCIÓMETRO

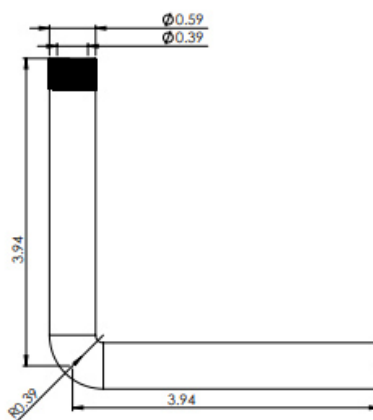


Figura A.9: Conexión tipo L para el (pH-metro)

A.10 CONECTOR MACHO TIPO CPI

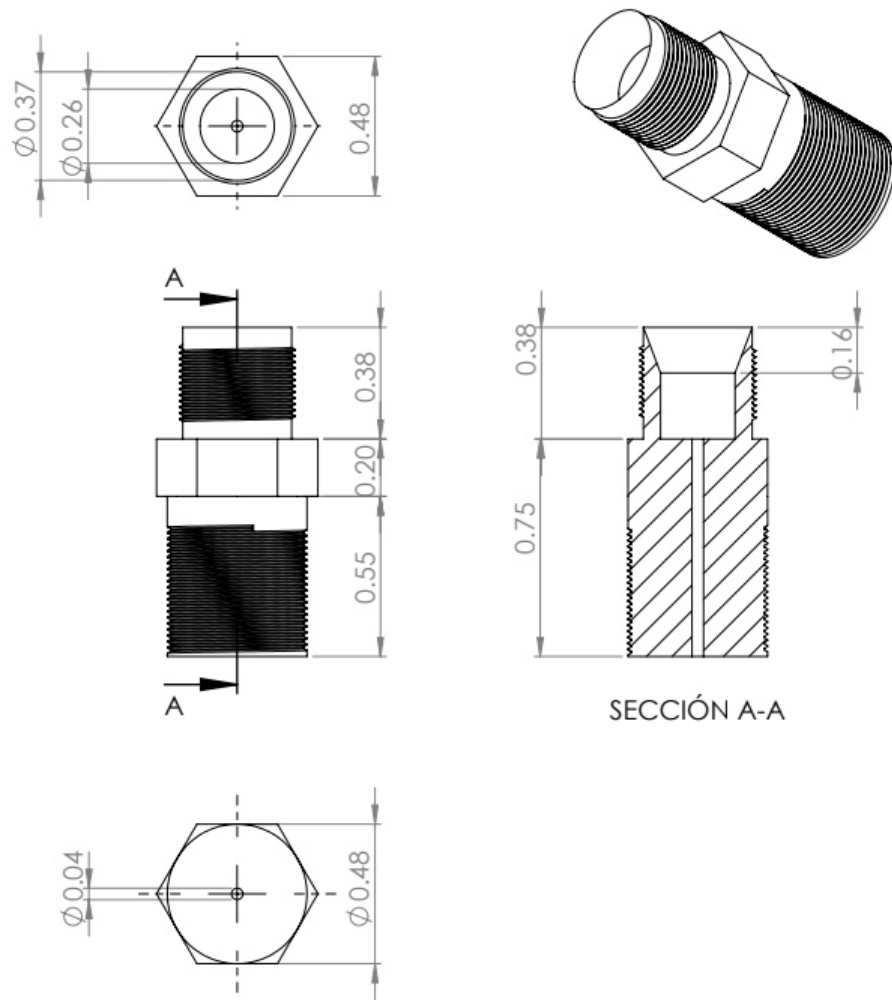


Figura A.10: Cuerpo del conector para tubo de un 1/4

A.11 CONECTOR MACHO TIPO CPI

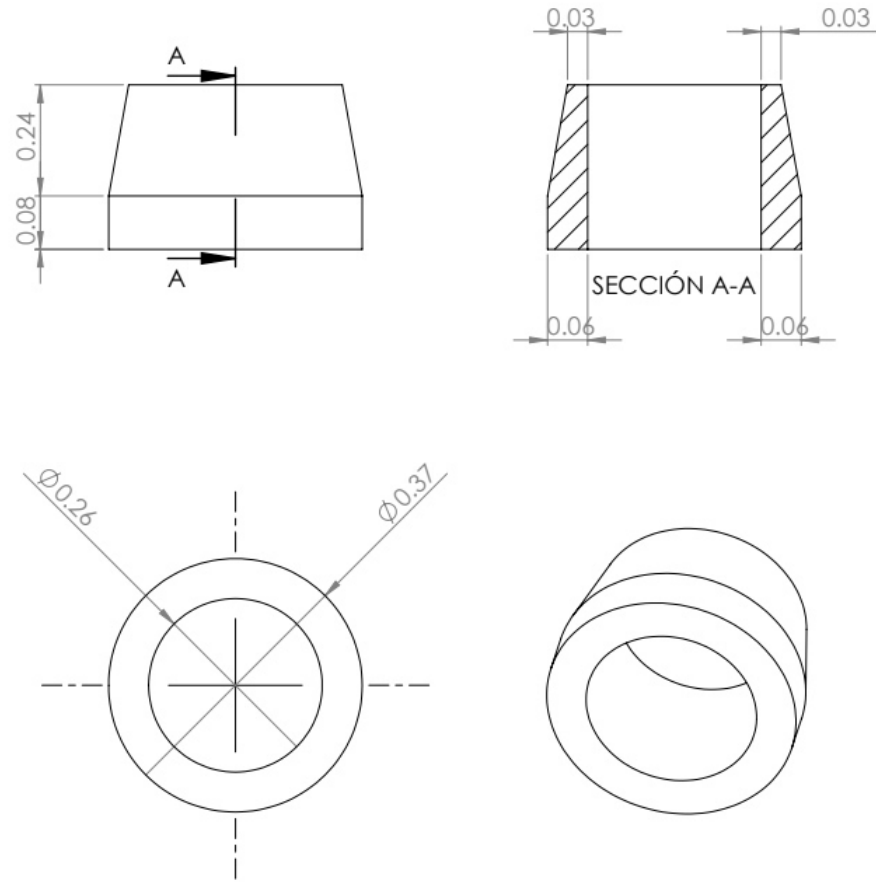


Figura A.11: Cono reductor del conector

A.12 CONECTOR MACHO TIPO CPI

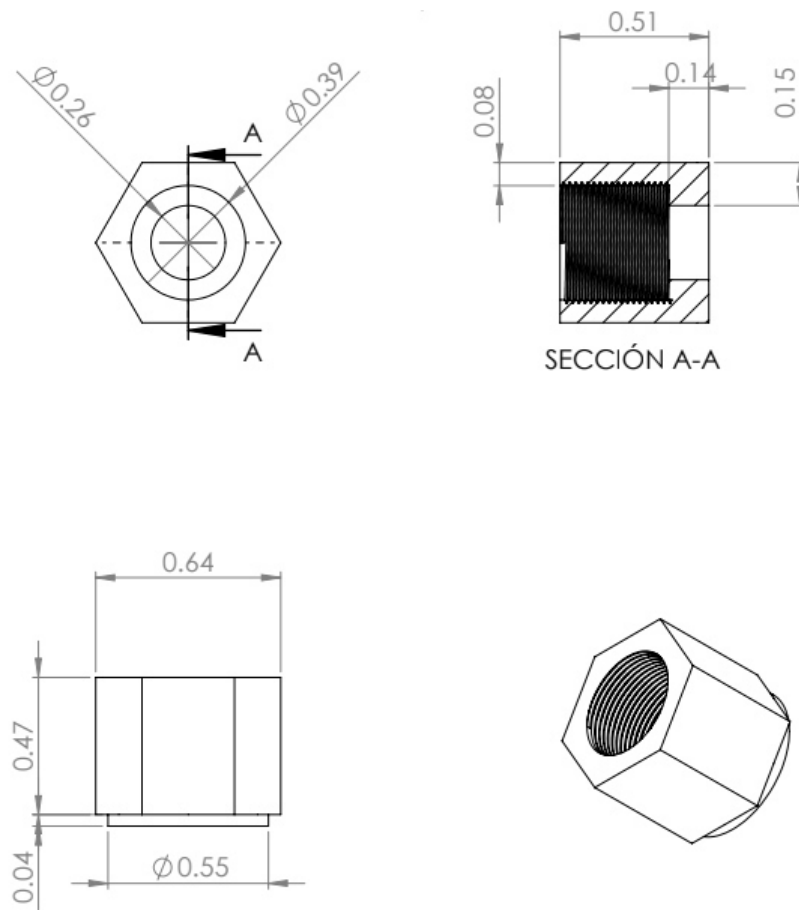


Figura A.12: Tuerca del conector

A.13 MANUAL REACTOR HÍBRIDO TIPO BATCH



INSTALACIÓN REACTOR HÍBRIDO TIPO BATCH

MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIODIÉSEL Y BIOETANOL

ALEX NIBARDO DE LUCIO LÓPEZ



Figura A.13: Manual del funcionamiento del reactor híbrido tipo batch

A.14 CURVA DE LIBERACIÓN DE CALOR DE LOS PODERES CALORÍFICOS

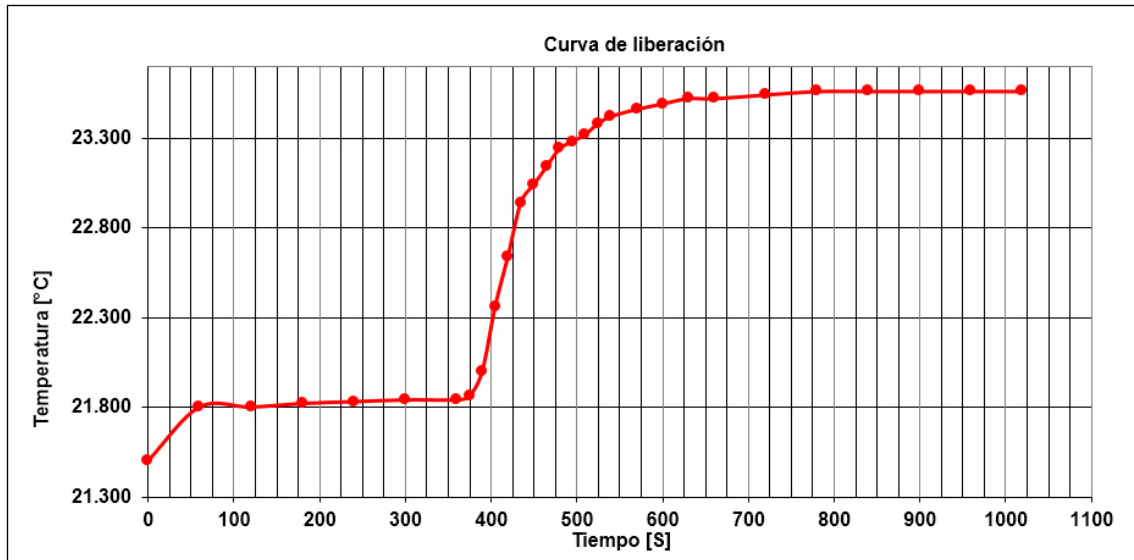


Figura A.14: Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 78 °Brix

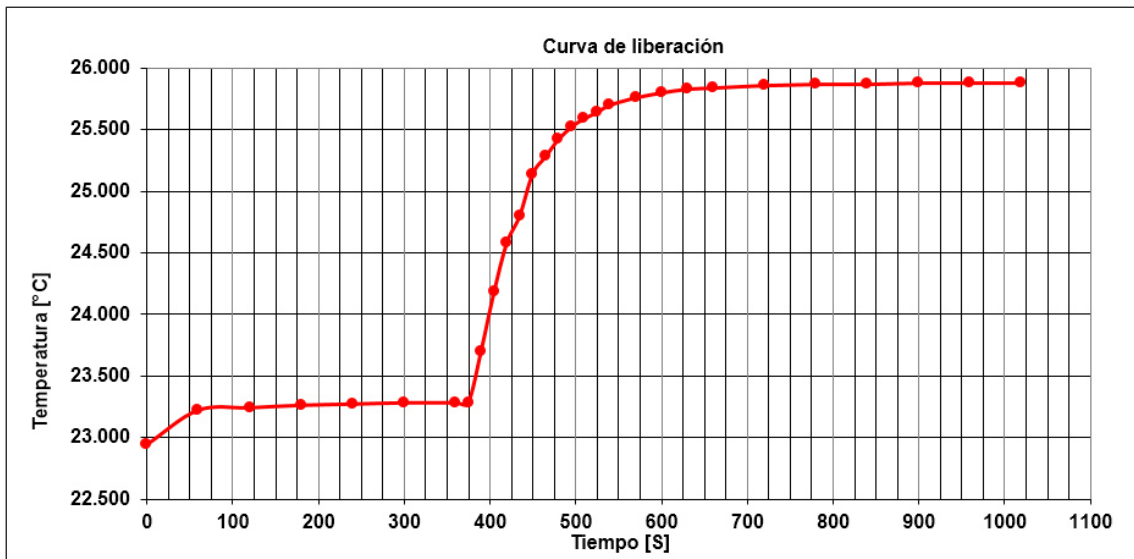


Figura A.15: Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 78 °C segunda destilación

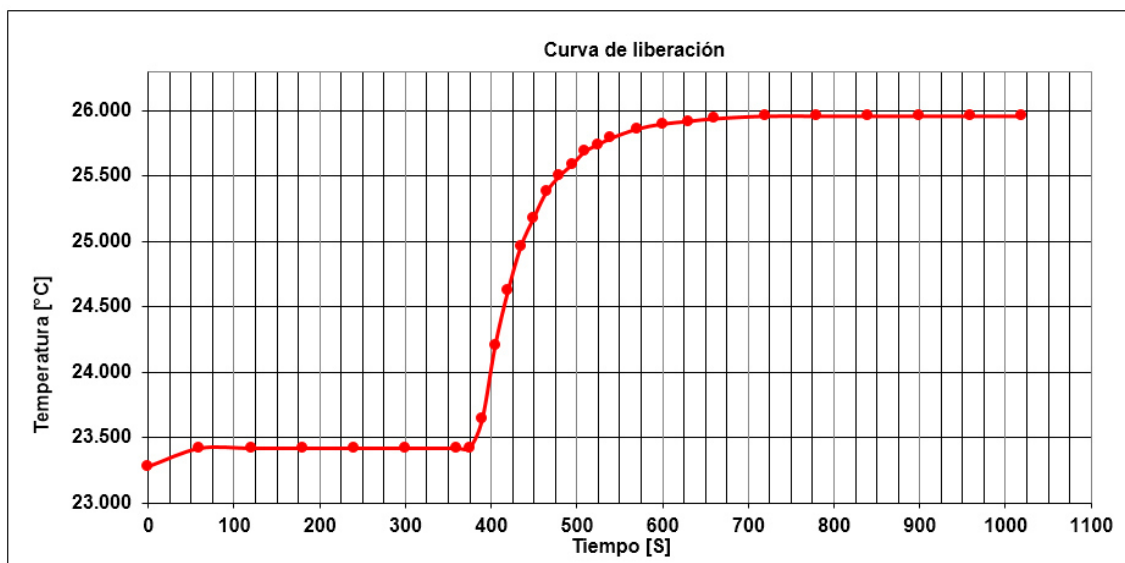


Figura A.16: Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 85 °C segunda destilación

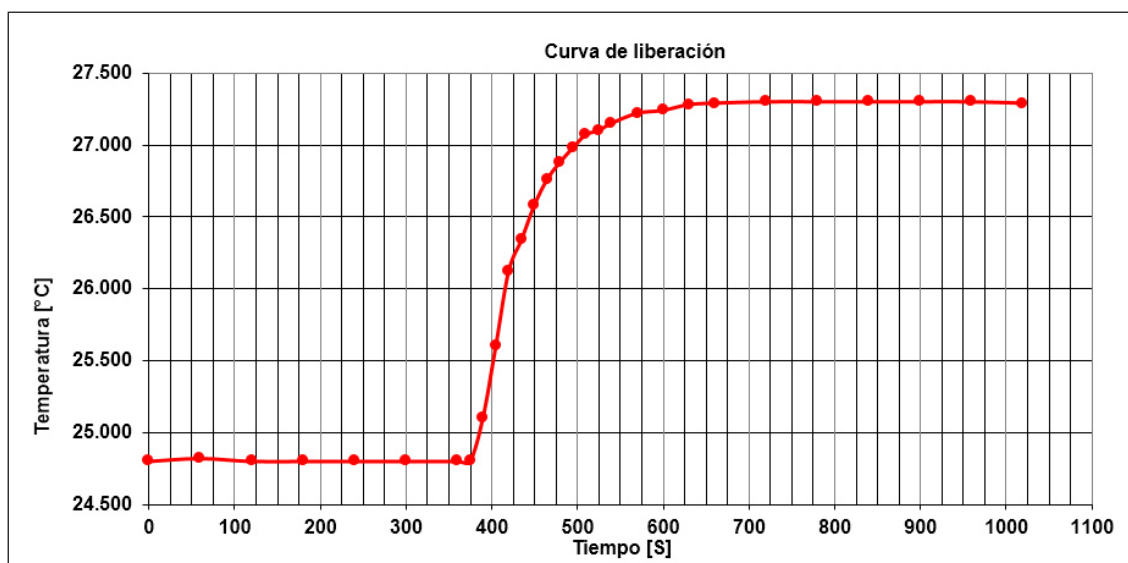


Figura A.17: Poder calorífico inferior bioetanol reactor a 90 °C segunda destilación

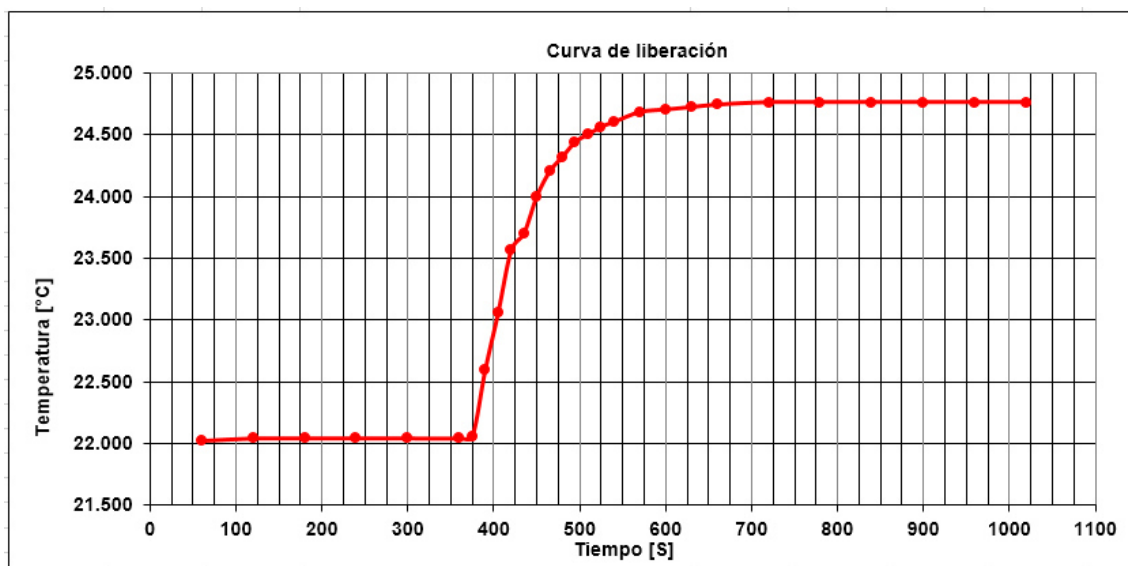


Figura A.18: Poder calorífico inferior alcohol etílico absoluto laboratorio

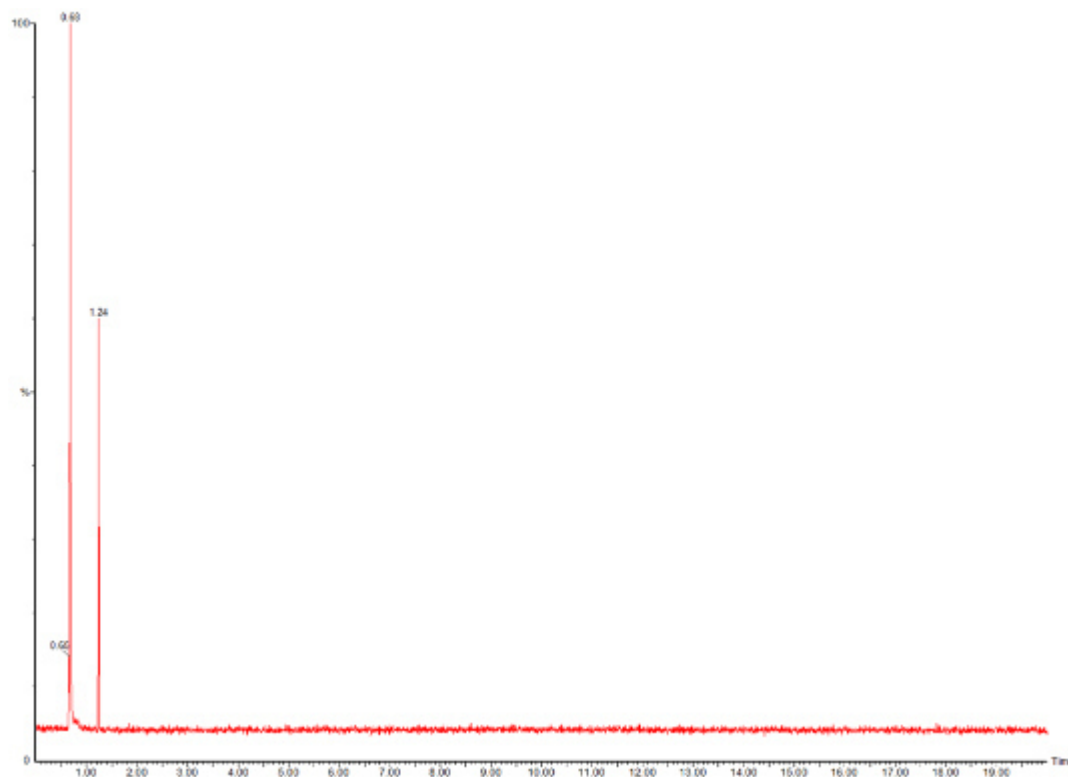


Figura A.19: Tiempos de retención de la cromatografía del etanol absoluto de laboratorio

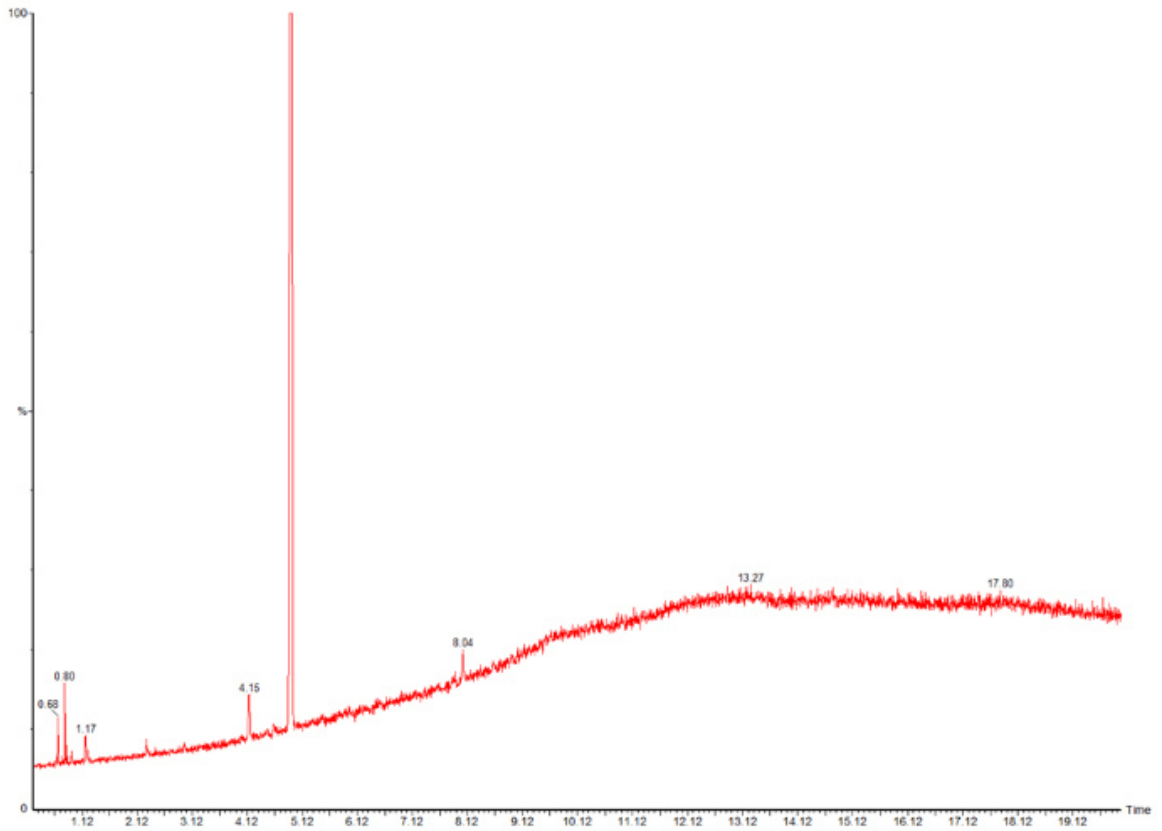


Figura A.20: Tiempos de retención de la cromatografía del bioetanol a nivel reactor

REFERENCIAS

- [1] Avinash Kumar Agarwal. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in energy and combustion science*, 33(3):233–271, 2007.
- [2] Luis Armando Becerra Pérez. La industria del etanol en México. *Economía unam*, 6(16):82–98, 2009.
- [3] José L Montañez, Juan C Victoria, Rebeca Flores, and María Á Vivar. Fermentación de los fructanos del agave tequilana weber azul por *Zygomonas mobilis* y *Saccharomyces cerevisiae* en la producción de bioetanol. *Información tecnológica*, 22(6):3–14, 2011.
- [4] HJ Vázquez and Oscar Dacosta. Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 8(4):249–259, 2007.
- [5] Ren21 renewables 2018 global status report. http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/, 2018.
- [6] Mustafa Balat, Havva Balat, and Cahide Öz. Progress in bioethanol processing. *Progress in energy and combustion science*, 34(5):551–573, 2008.
- [7] Seungdo Kim and Bruce E Dale. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy*, 26(4):361–375, 2004.
- [8] Energy Efficiency y Renewable Energy. Global ethanol production. <http://www.afdc.energy.gov/data/search?q=ethanol>.

- [9] Secretaría de Energía. Balance nacional de energía 2016. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016__2_.pdf.
- [10] Sistema de Información Energética. Balance energético nacional. <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>.
- [11] Zafra. Producción y consumo de alcohol etílico en México. <https://www.zafranet.com>.
- [12] Cole Gustafson. History of ethanol production and policy, north dakota state university. <http://www.ag.ndsu.edu/energy/biofuels/energy-briefs/history-of-ethanol-production-and-policy>.
- [13] José M Desantes and Francisco Payri González. *Motores de combustión interna alternativos*. Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
- [14] Waukesha Engine División Dresser Industries INC. An international historic mechanical engineering landmark. the waukesha cfr fuel research engine. <http://www.asme.org/getmedia/ffedc33f-7e2b-4775-95ec-2f633ddc16f6/50-Cooperative-Fuel-Research-Engine-1928.aspx>.
- [15] Pablo Gómez-Gordo Villa. Desarrollo de un sistema de control automático aplicado a un motor cfr para el estudio físico-químico de la combustión. Master's thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2017.
- [16] Espinal Víctor *et al.* Diseño, construcción y validación de un equipo de destilación de alcohol etílico. http://ri.ues.edu.sv/1790/1/Dise%C3%B1o_y_validacion_de_un_equipo_de_destilacion_de_alcohol_etilico.pdf, 2009.
- [17] Cholota Palate, Luis Olmedo, and Oscar Lizandro Mora Ruiz. Diseño, construcción y pruebas de un sistema prototipo para la producción de etanol a partir de papa, zanahoria, remolacha y lacto suero. B.S. thesis, 2010.

- [18] Luis Fernando Santis Espinosa. Desarrollo y caracterización de un fermentador-destilador para la producción de bioetanol. Master's thesis, Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México., 2011.
- [19] AA Flores Hernández, M Flores Montiel, J Reyes Reyes, and CM Astorga Zaragoza. Diseño y modelado de un bioreactor tipo batch y continuo para aplicaciones de control automático, 2013.
- [20] Mohammad Emal Qazizada. Design of a batch stirred fermenter for ethanol production. *Procedia Engineering*, 149:389–403, 2016.
- [21] Tadeu C Cordeiro de Melo, Guilherme B Machado, Carlos RP Belchior, Marcelo J Colaço, José EM Barros, Edimilson J de Oliveira, and Daniel G de Oliveira. Hydrous ethanol–gasoline blends–combustion and emission investigations on a flex-fuel engine. *Fuel*, 97:796–804, 2012.
- [22] Patricia Castillo Hernández. Estudio de la propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos con etanol al 10 % y 15 % en volumen-edición única. 2008.
- [23] Konrad Reif. Gasoline engine management. *Friedrichshafen: Springer Vieweg*, 2015.
- [24] *Waukesha* CFR. Model:f1/f2. [http://http://www.waukeshacfr.com/f1-f2/](http://www.waukeshacfr.com/f1-f2/), 2017.
- [25] infoAgro. El cultivo de las naranjas. <http://www.infoagro.com/citricos/naranja.htm>.
- [26] Julio Joaquín Virreira Flores and Oscar Alan Cristian Góngora Pereira. Caracterización fisicoquímica de las cascaras de naranja (*citrus sinensis* l.) y pomelo (*citrus grandis*), para obtener bioetanol-iquitos. 2014.
- [27] Ziba Bakhtiyari, Masoud Yazdanpanah, Masoumeh Forouzani, and Navab Kazemi. Intention of agricultural professionals toward biofuels in iran: Implications

- for energy security, society, and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:341–349, 2017.
- [28] Producción de biomasa para biocombustibles líquidos: el potencial de américa latina y el caribe. <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocomustibles/CEPAL/produccion%20de%20biomasa.pdf>, 2007.
- [29] José Stratta. Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel. *Agosto de*, 2000.
- [30] Situación de lo biocombustibles de 2da y 3era generación en américa latina y caribe. <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocomustibles/SITUACION%20DE%20BIOCOMBUSTIBLES%20EN%20ALC.pdf>, 2010.
- [31] Juan Manuel García and J García. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. *Informe de Vigilancia Tecnológica*, 2006.
- [32] U.s. energy information administration - eia - independent statistics and analysis. https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=biomass_home, 2017.
- [33] Bioetanol de caña de azúcar energía para el desarrollo sostenible. <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocomustibles/CEPAL/bioetanol%20ca%C3%B1a%20de%20azucar.pdf>, 2008.
- [34] El estado mundial de la agricultura y la alimentación. <http://www.fao.org/3/a-i0100s.pdf>, 2008.
- [35] Ricardo Guerrero, Gustavo Marrero, José M Martínez-Duart, and Luis A Puch. *Biocombustibles líquidos: Situación actual y oportunidades de futuro para España*. Fundación IDEAS, 2010.
- [36] Ethanol - energy explained, your guide to understanding energy - energy information administration. https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=biofuel_ethanol_home, 2017.

- [37] Fabrizio Saladini, Nicoletta Patrizi, Federico M Pulselli, Nadia Marchettini, and Simone Bastianoni. Guidelines for energy evaluation of first, second and third generation biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66:221–227, 2016.
- [38] N Gaurav, S Sivasankari, GS Kiran, A Ninawe, and J Selvin. Utilization of bio-resources for sustainable biofuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73:205–214, 2017.
- [39] Ralph EH Sims, Warren Mabee, Jack N Saddler, and Michael Taylor. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource technology*, 101(6):1570–1580, 2010.
- [40] Kevin A Gray, Lishan Zhao, and Mark Emptage. Bioethanol. *Current opinion in chemical biology*, 10(2):141–146, 2006.
- [41] Bioetanol con caña de azúcar, una energía para el desarrollo sostenible. https://www.academia.edu/8471953/Bioetanol_con_ca%C3%B1a_de_azucar, 2008.
- [42] Carlos Ariel Cardona Alzate. Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos latinoamericano y mundial. *Revista de ingeniería*, (29), 2009.
- [43] Ana Lilia Miranda Osornio. Valuación de opciones compuestas del etanol en México (2004-2010).
- [44] Mairan Guigou. Producción de bioetanol combustible a partir de boniato. Master's thesis, Facultad de ciencias. Universidad de la República., 2011.
- [45] Victor Hugo Chanta Torres. Producción de biocombustible a partir de biomasa lignocelulósica de sorgo dulce por extracción de vapor. Master's thesis, Facultad de Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Piura., 2011.
- [46] Manuel Coronel. Los vinos de frutas. *Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Tecnológica Equinoccial, Av. Occidental y Mariana de Jesús. Quito, Ecuador*, 2008.

- [47] Miguel Muñoz and Gustavo Catrilaf. Estimación de parámetros cinéticos de *saccharomyces cerevisiae* en sistema de fermentación batch bajo distintas condiciones de crecimiento. *C:/Users/USUARIO/Downloads/Proyecto % 20final % 20Saccharomyces % 20cerevisiae. pdf*. Consultado, 8, 2013.
- [48] Marta Argemí Fontvila. Diseño de un biorreactor para la fabricación de la cerveza. 2016.
- [49] Harold Schobert. *Chemistry of fossil fuels and biofuels*. Cambridge University Press, 2013.
- [50] Quiguirí Quiguirí, Jhonny Freddy, and Mayra Alejandra Carillo Robalino. Construcción de un destilador para la implementación del laboratorio de operaciones unitarias en la facultad de ingeniería. B.S. thesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2011., 2011.
- [51] M Lopez Sanchez, J Triana Méndez, FJ Perez Galván, and María Esther Torres Padrón. Métodos físicos de separación y purificación de sustancias orgánicas. *Las Palmas*, 2005.
- [52] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D86-04 Sstandard test method for distillation of petroleum products at atmospheric pressure. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [53] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D240 Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [54] Juan Carlos Solís Ulloa. Diseño y construcción de un reactor híbrido tipo batch para la producción de biocombustibles: biodiésel y bioetanol como caso de estudio. Master's thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2017.
- [55] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D1298-99 Sstandard test method for density, relative density (specific gravity), or api

gravity of petroleum and liquid petroleum products by the hydrometer method. ASTM, West Conshohocken, PA.

- [56] Flor De Lis Corral Gómez. Estudio del efecto de las propiedades de mezclas ternarias de combustibles en el proceso de mezclas en mec. Master's thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2017.
- [57] D ASTM. 6352. american society for testing and materials. *Método de ensayo para la distribución de puntos de ebullición de destilados de petróleo en un rango de ebullición de 174 a 700° C por cromatografía de gases*, 2000.
- [58] Cromatografo de gases. http://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf.
- [59] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D2700-16 Sstandard test method for reserach octane number of spark-ignition engine fuel. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [60] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D2700-16a Sstandard test method for motor octane number of spark-ignition engine fuel. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [61] Yunus A Cengel and Afshin Ghajar. *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [62] Maurizia Seggiani, M Vittoria Prati, M Antonietta Costagliola, Monica Puccini, and Sandra Vitolo. Bioethanol–gasoline fuel blends: Exhaust emissions and morphological characterization of particulate from a moped engine. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(8):888–897, 2012.
- [63] Guillermo Rubio Gómez. Estudio de la combustión de mezclas de gasolina-bioalcoles en un motor de combustión variable cfr. Master's thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2018.

- [64] Mert Gülüm and Atilla Bilgin. Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel–diesel fuel blends. *Fuel Processing Technology*, 134:456–464, 2015.
- [65] Ertan Alptekin and Mustafa Canakci. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renewable energy*, 33(12):2623–2630, 2008.
- [66] Barrera Vela, Richar Nixon, Reyes Muro, and Jhonanta Luis. Optimización de los parámetros del proceso de fermentación del jugo de caña para obtener bioetanol en la planta piloto de alcohol de la facultad de ingeniería química-unap.
- [67] Griselda Margarita Girón Monterrosa and Laura Jaqueline Funes Flores. *Obtención de alcohol etílico por medio de fermentación alcohólica de las cáscaras de musa paradisíaca (plátano) utilizando como microorganismo productor saccharomyces cerevisiae (levadura)*. PhD thesis, Universidad de El Salvador, 2013.
- [68] María del Carmen Schvab and Roque Alberto Hours. *Bebida alcohólica de jugo de naranja: Estudio de los parámetros de calidad, influencia de las variables de proceso y caracterización del producto*. Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- [69] Y Chan. Industrialización de alimentos, frutas y vegetales. guácimo, cr, en línea, 2006.
- [70] Jesus Fernandez. Energías renovables para todos: Biocarburantes. 2012.
- [71] Lin Luo, Ester Van Der Voet, and Gjalt Huppes. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in brazil. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7):1613–1619, 2009.
- [72] Lourdes Margarita Zumalacárregui-De Cárdenas, Pérez-Ones Osney, Rodríguez-Ramos Pedro Antonio, María Zumalacárregui-De CárdenasBeatriz, and Lom-

- bardi Geraldo. Potential uses of bagasse for ethanol production versus electricity production. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(3):407–418, 2015.
- [73] Pere Valls i Puyalto. Biocombustibles. *Manual formativo de ACTA*, (35):53–60, 2005.
- [74] Edgar Paz Pérez, João Andrade de Carvalho Jr, Luiz Roberto Carrocci, Marco Aurelio Ferreira, Ely Vieira Cortez, and Carlos Romero Luna. Estudio comparativo entre la quema directa de diesel y alcohol etílico hidratado. In *IN: 8º CONGRESO “IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA”*, Cusco, 2007.
- [75] X Yáñez Rueda, LL Lugo Mancilla, and DY Parada Parada. Estudio del aceite esencial de la cáscara de la naranja dulce (citrus sinensis, variedad valenciana) cultivada en labateca (norte de santander, colombia). *Bistua: Revista de la facultad de Ciencias Básicas*, 5(1), 2007.
- [76] Christopher P Cooney, Jeremy J Worm, and Jeffrey D Naber. Combustion characterization in an internal combustion engine with ethanol- gasoline blended fuels varying compression ratios and ignition timing. *Energy & Fuels*, 23(5):2319–2324, 2009.
- [77] Francisco Payri González and José M^a Desantes Fernández. *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2011.