

**UNIVERSIDAD ECCI**  
**DIRECCION DE POSTGRADOS**  
**PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERIA**

**PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE REFINADO DE  
PALMA MEDIANTE TRANSESTERIFICACIÓN CON ETANOL  
EVALUANDO EL EFECTO EN UNA PLANTA TÉRMICA PILOTO:  
CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MEDIO AMBIENTAL.**

**ING. ESP. JORGE VICENTE GUZMÁN LAVERDE**  
**ING. FRANCISCO JAVIER GALINDO MENDOZA**

**ASESORES:**

**DIRECTORA: DRA. MARIA GABRIELA MAGO - UNIVERSIDAD ECCI**

**CODIRECTOR: Ing. MSc. MAURICIO ANIBAL SIERRA SARMIENTO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA –  
UNIAGRARIA**

**MAESTRIA EN INGENIERIA CON ÉNFASIS EN MECÁNICA**

**DIRECCIÓN DE POSGRADOS**

**UNIVERSIDAD ECCI**

**BOGOTA, OCTUBRE, 2020**



**This work is licensed under the Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.**

**PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE REFINADO DE  
PALMA MEDIANTE TRANSESTERIFICACIÓN CON ETANOL  
EVALUANDO EL EFECTO EN UNA PLANTA TÉRMICA PILOTO:  
CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MEDIO AMBIENTAL.**

**ING. ESP. JORGE VICENTE GUZMÁN LAVERDE**

**ING. FRANCISCO JAVIER GALINDO MENDOZA**

MAESTRIA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN MECÁNICA

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

UNIVERSIDAD ECCI BOGOTÁ D.C.

OCTUBRE, 2020



This work is licensed under the Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

**Nota de aceptación:**

Aprobado por el Comité de Grado en Cumplimiento de los requisitos exigidos por la UNIVERSIDAD ECCI para optar el título de Maestría en Ingeniería con énfasis en Mecánica.

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bogotá D.C. OCTUBRE, 2020**

## **DEDICATORIA**

Primero que todo a Dios, darte las gracias  
porque tú eres lo más grande de este mundo,  
me has concedido la vida y la oportunidad de culminar este sueño;  
gracias a Cecilia, mi madre, que con tus palabras me has dado el impulso  
y con tu apoyo económico, el poder cumplir con este logro;  
y gracias a Adriana, mi esposa y a Luciana, mi hija,  
que las amo con todo mi corazón,  
por el sacrificio en los tiempos dejados de compartir  
y su comprensión en el desarrollo de la maestría,  
porque sin ustedes esta meta no la habría culminado.

**JORGE GUZMÁN LAVERDE**

### **A Dios**

Dedico esta tesis a mi amado Dios, quien por su infinita misericordia me ha dado sabiduría, inteligencia y una hermosa familia.

### **A mi esposa e hija**

Amada Gladys gracias por tu amor, tu apoyo y compañía, siempre has sido una ayuda idónea en mi vida, y en mis planes tu siempre estas, te amo con todo mi corazón.

Querida Lina María, eres un regalo que Dios me dio para conocer el verdadero amor de padre, tu presencia es un motor en mi vida que me hace feliz cada instante de mi existencia.

### **A mis padres**

Papa gracias por compartir conmigo tus experiencias, por enseñarme a trabajar y ser una persona útil a la sociedad, por escucharme y apoyarme moralmente en momentos de dificultad.

Mama, tus palabras de aliento me impulsaron en este proceso, gracias por sacrificarte y apoyarme económicamente, gracias por el amor que me brindas cada día.

**FRANCISCO GALINDO MENDOZA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. María Gabriela Mago, directora de tesis,  
por su gestión y colaboración en alcanzar las metas de este trabajo,  
al Ing. MSc. Mauricio Sierra, codirector de tesis, quien transmitió todos sus  
conocimientos para que este proyecto fuera una realidad,  
a todos los profesores que con su dedicación  
hicieron que la maestría fuera un espacio de discusión y aprendizaje  
y por último a mis compañeros por su colaboración,  
trabajo en equipo y compañerismo.

**ING. FRANCISCO GALINDO MENDOZA**

**ING. ESP. JORGE GUZMÁN LAVERDE**

# ÍNDICE

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE GRÁFICAS	12
LISTA DE ANEXOS	13
LISTA DE ECUACIONES	14
INTRODUCCIÓN	15
RESUMEN	17
SUMMARY	18
CAPITULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	19
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3. OBJETIVO GENERAL	20
1.4. OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
1.5. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.6. DELIMITACIÓN	22
1.7. LIMITACIONES	22
CAPITULO II. MARCO TEORICO	24
2. GENERALIDADES DEL BIODIÉSEL	24
2.1. RESEÑA HISTÓRICA DEL DESARROLLO DEL BIODIÉSEL	25
2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL BIODIÉSEL	26
2.3. COMPARATIVO ENTRE DIÉSEL Y BIODIÉSEL	27
2.4. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL	28
2.4.1. TRANSESTERIFICACIÓN	28
2.4.2. OTROS MÉTODOS	29
2.4.3. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN	30
2.5. MATERIAS PRIMAS PARA EL BIODIÉSEL	31
2.5.1. ACEITES Y GRASAS	32
2.5.1.1. ACEITE DE PALMA	33
2.5.2. CATALIZADORES	33
2.5.2.1. Catalizadores alcalinos o básicos	34
2.5.2.2. Catalizadores ácidos	34
2.5.2.3. Catalizadores enzimáticos	34

2.5.2.4.	Catalizadores Heterogéneos	34
2.5.3.	ALCOHOLES	35
2.5.4.	EFEECTO DE LAS EMISIONES EN LA ATMÓSFERA	36
2.6.	ESTADO DEL ARTE	37
2.6.1.	INTERNACIONAL	37
2.6.2.	LATINOAMERICANO	40
2.6.3.	COLOMBIANO	42
2.7.	MARCO CONCEPTUAL	43
CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO		46
3.1.	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	46
3.2.	TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS	46
3.3.	FASES METODOLOGICAS	48
3.3.1.	PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A ESCALA LABORATORIO	48
3.3.1.1.	IDENTIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	49
3.3.2.	DESARROLLO DEL EXPERIMENTO EN LABORATORIO	50
3.3.3.	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL	53
3.3.3.1.	Densidad	54
3.3.3.2.	Viscosidad (cinemática a 40°C)	54
3.3.3.3.	Número Ácido	54
3.3.3.4.	Punto de flama	54
3.3.4.	PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN PLANTA PILOTO	55
3.3.4.1.	BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO	56
3.3.5.	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL EN PLANTA TÉRMICA PILOTO	57
3.3.5.1.	Consumo	57
3.3.5.2.	Ambiental	58
3.3.5.3.	Caracterización Física	58
3.4.	LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	59
3.4.1	MAQUINARIA Y EQUIPOS	60
3.4.1.1	ENSAYOS DE LABORATORIO	60
3.4.1.2	PLANTA PILOTO DE BIODIÉSEL	60
3.4.1.3	ANALIZADOR DE EMISIÓN DE GASES	74
3.5.	POBLACIÓN Y MUESTRA	75
3.5.1.	DISEÑO EXPERIMENTAL	76
3.5.1.1.	Diseño experimental del proceso de obtención de biodiésel a nivel laboratorio	76
3.5.1.2.	Diseño experimental en la planta térmica piloto	77

3.5.1.2.1.	Consumo de biodiésel por mezcla	80
3.5.1.2.2.	Diseño experimental de emisiones del biodiésel	80
3.5.1.2.3.	Diseño experimental de la cantidad de aire (Xs) requerido para la combustión	80
3.5.1.2.4.	Diseño experimental de la temperatura de los gases emitidos por la combustión	81
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		82
4.1.	PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A NIVEL LABORATORIO	82
4.1.1.	RESULTADOS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL	82
4.1.2.	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO	83
4.1.2.1.	NÚMERO ACIDO	83
4.1.2.2.	DENSIDAD	85
4.1.2.3.	VISCOSIDAD CINEMÁTICA	86
4.1.2.4.	PUNTO DE FLAMA	87
4.2.	PRUEBAS REALIZADAS EN PLANTA TÉRMICA PILOTO	90
4.2.1.	CONSUMO DE BIODIÉSEL	90
4.2.2.	EMISIONES DE O <sub>2</sub> DEL BIODIÉSEL	92
4.2.3.	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> DEL BIODIÉSEL	93
4.2.4.	EMISIONES DE CO DEL BIODIÉSEL	95
4.2.5.	EMISIONES DE NO DEL BIODIÉSEL	96
4.2.6.	EMISIONES DE NO <sub>x</sub> DEL BIODIÉSEL	97
4.2.7.	CANTIDAD DE AIRE REQUERIDO PARA LA COMBUSTIÓN	99
4.2.8.	TEMPERATURA DE SALIDA DE GASES (T)	100
4.2.9.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA	102
4.3.	DISCUSIÓN	103
4.3.1.	BIODIÉSEL A NIVEL LABORATORIO	103
4.3.2.	BIODIÉSEL FABRICADO EN PLANTA PILOTO	103
4.3.3.	CONSUMO DE BIODIÉSEL EN PLANTA TÉRMICA PILOTO	103
4.3.4.	EMISIONES ATMOSFÉRICAS	104
4.3.5.	POTENCIA	106
CAPITULO V		107
5.1.	CONCLUSIONES	107
5.2.	PROSPECTIVA	108
BIBLIOGRAFIA		109
ANEXOS		113



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas del biodiésel	26
Tabla 2. Diésel vs. Características del biodiésel	27
Tabla 3. Características de las plantas BIOSMART	31
Tabla 4. Materias primas de biodiésel	32
Tabla 5. Propiedades físico-químicas del aceite de palma	33
Tabla 6 Propiedades biodiésel producidos con metanol y etanol	35
Tabla 7. Generación global de Energía por biomasa	39
Tabla 8. Caracterización del aceite refinado de palma	49
Tabla 9. Cantidad de materia prima para la obtención de biodiésel	50
Tabla 10. Equipos utilizados para la obtención del biodiésel en el laboratorio	50
Tabla 11. Caracterización del biodiésel según NTC 5444	54
Tabla 12. Características de caudalímetro de vapor planta térmica piloto Universidad ECCI	70
Tabla 13. Parámetros de medición analizador de gases	74
Tabla 14. Modelo factorial obtención biodiésel	76
Tabla 15. Resultados Anova	79
Tabla 16. Densidad del biodiésel a nivel laboratorio	85
Tabla 17. Densidad del biodiésel de planta piloto	85
Tabla 18. Tiempos para viscosidad a nivel laboratorio	86
Tabla 19. Tiempos para viscosidad en planta piloto	87
Tabla 20. Consumo de combustible de caldera en condiciones de fábrica	90
Tabla 21. Aforo del consumo de diésel en caldera	90
Tabla 22. Potencia eléctrica producida en planta piloto	102
Tabla 23. Resumen de las pruebas de consumo y emisiones de biodiésel	106
Tabla 24. Consumo de biodiésel por mezcla	115
Tabla 25. Emisiones de O <sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel	115
Tabla 26. Emisiones de CO <sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel	116
Tabla 27. Emisiones de CO (ppm) por mezcla de biodiésel	117
Tabla 28. Emisiones de NO (ppm) por mezcla de biodiésel	117
Tabla 29. Emisiones de NO <sub>x</sub> (ppm) por mezcla de biodiésel	118
Tabla 30. Cantidad de aire requerido para la combustión (XS) del biodiésel	119
Tabla 31. Temperatura de salida de gases T (°C) por mezcla de biodiésel	119

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del desarrollo del biodiésel [26 ]	26
Figura 2. Reacción química de la transesterificación [27]	28
Figura 3. Diagrama del proceso de transesterificación [autores]	29
Figura 4. Mini-planta de biodiésel [30]	31
Figura 5. Diseño de la investigación. [autores]	48
Figura 6. Calentamiento del aceite de palma a 110°C	51
Figura 7. Medición del etanol y disolución del catalizador en el etanol	51
Figura 8. Sistema de reacción para la obtención de biodiésel en laboratorio	52
Figura 9. Separación del biodiésel de la glicerina	52
Figura 10. Producción de biodiésel a escala laboratorio [autores]	53
Figura 11. Balanceo estequiométrico del biodiésel para planta piloto de biodiésel	56
Figura 12. Operación en planta piloto [autores]	57
Figura 13. Procedimiento para caracterización de consumo de biodiésel. [autores]	58
Figura 14. Ubicación sede Bogotá UNIAGRARIA [59]	59
Figura 15. Ubicación sede J Bogotá Universidad ECCI. [59]	59
Figura 16. Diagrama descriptivo de la planta piloto para producción de biodiésel [Autores]	60
Figura 17. Planta piloto de biodiésel UNIAGRARIA [autores]	61
Figura 18. Tanque de agua caliente planta piloto de biodiésel [autores]	62
Figura 19. Reactor planta piloto biodiésel UNIAGRARIA [autores]	62
Figura 20. Condensador de tubo y coraza planta piloto biodiésel UNIAGRARIA	63
Figura 21. Separador planta biodiésel UNIAGRARIA. [autores]	63
Figura 22. Tablero de control planta biodiésel – UNIAGRARIA [autores]	64
Figura 23. Planta térmica piloto Universidad ECCI. [autores]	65
Figura 24. Caldera de la planta térmica de la universidad ECCI [autores]	66
Figura 25. Tanque de alimentación de agua y retorno de condensados de la caldera [autores]	66
Figura 26. Tanque de combustible caldera de la planta térmica piloto. [autores]	67
Figura 27. Tablero de control principal planta térmica piloto [autores]	67
Figura 28. Suavizador de agua planta térmica piloto [autores]	68
Figura 29. Torre de enfriamiento de agua de la planta térmica piloto [autores]	68
Figura 30. Tanques de agua fría y caliente [autores]	69
Figura 31. Condensador de vapor de la planta térmica piloto [autores]	69
Figura 32. Distribuidor de vapor de la planta térmica piloto. [autores]	70
Figura 33. Caudalímetro de la planta térmica piloto. [autores]	70
Figura 34. Válvula PID planta térmica piloto. [autores]	71
Figura 35. Sobrecalentador planta térmica piloto. [autores]	71
Figura 36. Turbina de vapor planta térmica piloto [autores]	72
Figura 37. Isométrico planta térmica piloto Universidad ECCI [60]	72
Figura 38. Vista frontal planta térmica piloto Universidad ECCI. [60]	73
Figura 39. Vista posterior planta térmica piloto Universidad ECCI. [60]	73
Figura 40. Analizador de gases utilizado en las pruebas [autores]	74
Figura 41. Toma de tiempo para calcular la viscosidad [autores]	86
Figura 42. Llenado de copa para el cálculo de biodiésel [autores]	88
Figura 43, Medición del punto de flama. [autores]	89
Figura 44. Análisis ANOVA del Consumo de biodiésel por mezcla. [autores]	115
Figura 45. Análisis ANOVA de emisiones de O <sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel [autores]	116

- Figura 46. Análisis ANOVA de emisiones de CO<sub>2</sub> (%) de las mezclas de biodiésel [autores] 116
- Figura 47. Análisis ANOVA de emisiones de CO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores] 117
- Figura 48. Análisis ANOVA de emisiones de NO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores] 118
- Figura 49. Análisis ANOVA de emisiones de NO<sub>x</sub> (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores] 118
- Figura 50. Análisis ANOVA de aire requerido para la combustión (XS) del biodiésel [autores] 119
- Figura 51. Análisis ANOVA temperatura de emisión de gases de mezclas de biodiésel [autores] 120

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Reservas mundiales de petróleo 2019 [11]	19
Gráfica 2. Usos del combustible fósil en Colombia [13]	19
Gráfica 3. Estimación de la producción mundial de biodiésel. [40]	37
Gráfica 4. Efecto del porcentaje de catalizador y exceso de alcohol sobre el rendimiento de biodiésel. [autores]	82
Gráfica 5. Interacción entre grupos de la producción de biodiésel a nivel laboratorio [autores]	83
Gráfica 6. Consumo de biodiésel en la planta térmica piloto. [autores]	91
Gráfica 7. Interacción entre grupos del consumo de biodiésel. [autores]	92
Gráfica 8. Emisiones de O <sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel [autores]	92
Gráfica 9. Interacción entre grupos de las emisiones de O <sub>2</sub> [autores].	93
Gráfica 10. Emisiones de CO <sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel [autores]	94
Gráfica 11. Interacción entre grupos de las emisiones de CO <sub>2</sub> (%) de las mezclas de biodiésel [autores]	94
Gráfica 12. Emisiones de CO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]	95
Gráfica 13. Interacción entre grupos de las emisiones de CO de las mezclas de biodiésel [autores]	96
Gráfica 14. Emisiones de NO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]	96
Gráfica 15. Interacción entre grupos de las emisiones de NO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]	97
Gráfica 16. Emisiones de NO <sub>x</sub> (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]	98
Gráfica 17. Interacción entre grupos de las emisiones de NO <sub>x</sub> (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]	98
Gráfica 18. Cantidad de aire requerido para la combustión (XS) del biodiésel [autores]	99
Gráfica 19. Interacción entre grupos del aire requerido en la combustión del biodiésel por mezcla (XS.) [autores]	100
Gráfica 20. Temperatura de los gases (°C) del biodiésel. [autores]	101
Gráfica 21. Interacción entre grupos de la temperatura de salida de gases T (°C) por mezcla de biodiésel [autores]	101

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO	113
ANEXO 2. DATOS EXPERIMENTALES	115
ANEXO 3. PRACTICA EN LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ACIDO.	
NORMA: ASTM 664-07	121
ANEXO 4. PRACTICA EN LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS GRASAS Y ACEITES ANIMAES Y VEGETALES Y LÍQUIDOS: NTC 336	123
ANEXO 5. PRACTICA DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACION DEL PUNTO DE FLAMA.	
NORMA: ASTM D 93-07	126
ANEXO 6. PRACTICA DE LABORATORIO DETERMINACION DE LA VISCOCIDAD CINEMATICA A 40°C. NORMA: ASTM D445-06	128
ANEXO 7. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A ESCALA LABORATORIO	130
ANEXO 8. CORRIDA DE BIODIÉSEL EN PLANTA PILOTO	134
ANEXO 9. CICLO DE VAPOR DE LA PLANTA TÉRMICA UNIVERSIDAD ECCI	136
ANEXO 10. PRUEBAS DE BIODISEL EN PLANTA TÉRMICA PILOTO	143
ANEXO 11. EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN	146
ANEXO 12. ARTÍCULO CIENTÍFICO SOMETIDO	147

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Potencia eléctrica	58
Ecuación 3. Modelo estadístico factorial 2 <sup>2</sup>	77
Ecuación 4. Análisis Anova unifactorial	78
Ecuación 5. Análisis Anova Unifactorial al cuadrado	78
Ecuación 6. Análisis Anova Unifactorial en términos cuadráticos	78
Ecuación 7. SCE (Variación inter grupos)	78
Ecuación 8. SCR (Variación intra grupos)	78
Ecuación 9. SCT (Variación total)	78
Ecuación 10. Significancia Anova	79
Ecuación 11. Índice de acidez	84
Ecuación 12. Cálculo de la Densidad (Ver anexo 2)	85
Ecuación 13. Viscosidad cinemática	86
Ecuación 14, Viscosidad dinámica ó absoluta	86
Ecuación 15. Punto de flama corregido	89

## INTRODUCCIÓN

El combustible diésel proveniente del petróleo se puede sustituir total o parcialmente por biodiésel, que por sus características es ecológico, biodegradable, atóxico y con un nivel de emisiones ambientales bajo, que ha llegado al nivel exigido por el protocolo de Kioto<sup>1</sup>.

El biodiésel fabricado a partir de aceite vegetal tiene ventajas con respecto a los combustibles fósiles porque desde el punto de vista económico su fabricación se hace más barata y los subproductos como la glicerina pueden ser utilizados en otros procesos obteniéndose beneficios financieros; y desde el punto de vista ambiental su fabricación es limpia[1], en caso de un vertimiento accidental puede reducir la contaminación de los suelos y es una fuente de energía renovable. [2]

El uso del biodiésel a partir del aceite refinado de palma ha dinamizado en Colombia la agroindustria de esta materia prima en esta década en relación con otras industrias, debido a que la áreas sembradas con palma han aumentado en los últimos 5 años en un nueve por ciento (9%), el noventa y tres por ciento (93%) de la producción nacional de aceites y grasas está representada por el aceite de palma y la tercera parte de esta producción se exporta [2].

De esta manera, la industria de combustibles renovables en Colombia está creciendo debido a que se está utilizando en una mezcla al diez por ciento (10%) con diésel y este porcentaje tiende a crecer con el tiempo[3], por lo que se hace necesario estudiar la producción de biodiésel a partir de materias primas tradicionales como fuentes de aceite comestible (palma, soya, maíz) [4] experimentando su aplicabilidad en una planta térmica piloto para caracterizarlo ambientalmente como un aporte novedoso a la investigación.

También se debe contemplar en el proceso de producción del biodiésel la utilización del etanol como reactivo en la reacción de transesterificación debido a que su forma de producción se realiza a partir de fuentes de energía renovables, siendo esto una ventaja, porque se convierte en una fuente de sustentabilidad energética que permite el desarrollo humano en sus dimensiones económica, social y medio ambiental[5].

Por lo tanto, el biodiésel cuya composición química no contiene azufre, aromáticos, ni aromáticos policíclicos, hace que las emisiones de material particulado se reduzcan y puede a futuro reducir la valoración económica de la baja calidad del aire<sup>2</sup> que según el Departamento Nacional de Planeación, en el año 2015 tuvo un costo de 12.1 billones de pesos equivalente al 1.5% del PIB [6].

---

<sup>1</sup> Protocolo de Kyoto: Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático [7]

<sup>2</sup> Valoración económica de la baja calidad del aire: Método que estima el valor del impacto ambiental de las actividades de consumo y de consumo [8]

En consecuencia, este proyecto es el fruto del acuerdo de voluntades entre las Universidades: Fundación Universitaria de Colombia - UNIAGRARIA y la Universidad ECCI; que tiene como finalidad la producción industrial de biocombustible a partir del aceite refinado de palma (ARP), a escala de laboratorio en la planta piloto de la Universidad Fundación Universitaria de Colombia - UNIAGRARIA, a través del proceso de transesterificación con etanol. Luego este producto se caracteriza físico-químicamente para que cumpla con norma ASTM D 6751<sup>3</sup> y posteriormente, en la planta térmica de la Universidad ECCI y con el biodiésel producido, se caracteriza física y ambientalmente.

En este documento, el capítulo I, hace referencia al planteamiento del problema. En este apartado se realiza la formulación y la justificación del proyecto estableciendo el objetivo general, los objetivos específicos y las delimitaciones de la investigación.

A continuación, en el capítulo II correspondiente al marco teórico, se muestran generalidades del biocombustible, características y comparaciones con el diésel, seguido por los métodos de producción y nuevas tecnologías para luego pasar a la descripción de las materias primas. Finalmente se realiza el estado del arte basado en investigaciones sobre el tema a nivel mundial, latinoamericano y local en donde se muestran cuáles son los aportes de cada uno de los autores, los trabajos a futuro o una pequeña crítica de los artículos estudiados.

Luego en el capítulo III, se define la metodología para el desarrollo del proyecto en donde se describen las técnicas y procedimientos de caracterización del biodiésel, la teoría de producción de biodiésel a nivel laboratorio y a nivel industrial para luego mostrar cómo se deben realizar las pruebas de caracterización del combustible en una planta térmica piloto.

Pasando al capítulo IV, en donde se realiza la parte experimental del proyecto indicando sus diferentes etapas, desde la caracterización de las materias primas, realizando el diseño de experimentos para la selección de las cantidades óptimas de catalizadores, hasta la producción a escala de laboratorio. A partir de esto, se realiza un nuevo diseño de experimentos para seleccionar la mezcla adecuada de combustible y realizar la producción del biocombustible. Por último, se realiza la prueba del biocombustible en la planta térmica piloto en donde se caracteriza ambiental y físicamente para finalmente realizar un último diseño de experimentos que dio como conclusión la mejor mezcla de biocombustible para uso industrial.

Para terminar, en el capítulo V, se muestran los resultados más relevantes obtenidos en el proyecto y se realizan las conclusiones respectivas de este proyecto de investigación, además la proyección del trabajo futuro que pueda surgir.

---

<sup>3</sup> ASTM D6751: Details standard and specifications por biodiesels with middle distillate fuels [9]



## RESUMEN

Esta investigación trata sobre la PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL a partir de ACEITE REFINADO DE PALMA mediante TRANSESTERIFICACIÓN CON ETANOL y la EVALUACIÓN DEL EFECTO EN UNA PLANTA TÉRMICA PILOTO realizando la CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MEDIO AMBIENTAL

La obtención de biocombustible es un ejemplo claro, que las energías renovables tienen una doble ventaja sobre combustibles de tipo fósil, ya que posibilitan la diversificación energética reduciendo la dependencia del petróleo y disminuyendo las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y CO. Por lo tanto, la finalidad de este trabajo es la producción de biodiésel a partir del aceite refinado de palma (ARP) mediante transesterificación utilizando dos (2) catalizadores (hidróxido de potasio y etanol) a escala de laboratorio y luego producirlo industrialmente en la planta piloto de biodiésel de la Fundación Universitaria de Colombia - UNIAGRARIA. Este producto se caracteriza de acuerdo a la norma ASTM D 6751, y posteriormente, se utiliza como combustible en la planta térmica piloto de la Universidad ECCI en donde se determina ambientalmente a través de medición de emisión de gases y físicamente con la potencia eléctrica y mecánica generada por la planta térmica piloto. De acuerdo a lo anterior, se obtuvo que el biodiésel producido a nivel laboratorio cumple con la norma ASTM D6751 por lo que se continuó con su producción industrial obteniendo también un biodiésel similar al anterior, luego se empleó como combustible para generación eléctrica, con diferentes mezclas entre biodiésel y diésel propiamente; en donde se obtienen resultados sobre el consumo de combustible en donde las mezclas B100 y B70 son las de mejor rendimiento, resultados sobre las emisiones atmosféricas de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NOX encontrando que las mezclas B70 y B100 son las mejores para el ambiente, resultados sobre la cantidad de aire requerido para una combustión eficiente en donde la mezcla B70 es la mejor, también resultados de la temperatura de salida de gases de combustión en donde los gases se emiten por debajo de los niveles requeridos por normas internacionales, y por último, resultados de la potencia eléctrica y mecánica generada por cada una de las mezclas de biocombustible, en donde la potencia no es dependiente las mezclas utilizadas en la planta térmica piloto utilizada. Se concluye cual es la mezcla óptima de biodiésel en cuanto a los resultados obtenidos comparados con el diésel puro y de acuerdo a lo anterior se establecen posibles trabajos a futuro que se pueden realizar sobre el estudio con la mezcla entre el ARP obtenido con un aceite vegetal usado, para obtener un comparativo y observar si el efecto puede ser de utilidad al ambiente porque podría dársele un uso alternativo a este último aceite producido industrialmente.

**PALABRAS CLAVES:** Producción de biodiésel, aceite refinado de palma, transesterificación, etanol, planta térmica piloto.

## SUMMARY

This research is about the PRODUCTION OF BIODIESEL from REFINED PALM OIL by ETHANOL TRANSESTERIFICATION and THE EVALUATION ON A PILOT THERMAL PLANT carrying out PHYSICAL AND ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION.

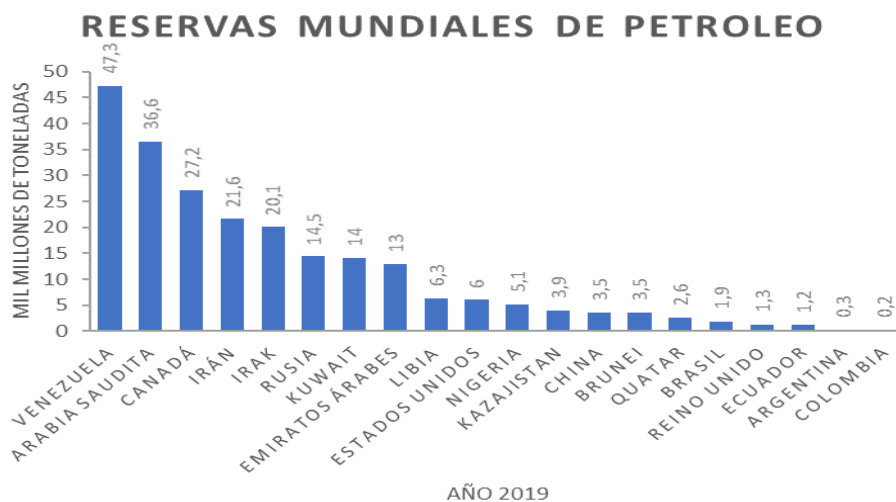
Biofuel's obtention is a clear example that renewable energies have a double advantage over fossil fuels, since they enable energy diversification by reducing dependence from oil and falling down global CO<sub>2</sub> and CO emissions. Therefore, this work's purpose is biodiesel's production from refined palm oil (RPO) by transesterification, using two (2) catalysts (sodium hydroxide and ethanol) in laboratory scale for later produce biodiesel industrially in its biodiesel's plant pilot. After that, this product is characterized according to ASTM D 6751, and subsequently, it is used as a fuel in the ECCI University's thermal plant pilot, it is determined environmentally through measurement of gas emissions and physically through the electrical power generated by the pilot thermal plant. According to the above, the biodiesel produced at laboratory level complies with the ASTM D6751 standard, so it continued with its industrial production, obtaining also a biodiesel similar to the previous one, then it was used as fuel for electrical generation, with different mixtures between biodiesel and diesel itself; the results obtained about fuel consumption show B100 and B70 mixtures are the ones with the best performance, results about atmospheric emissions of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>x</sub>, show that the B70 and B100 mixtures are the best for the environment, results on the amount of air required for efficient combustion demonstrated that B70 mixture is the best, also results on the flue gas outlet temperature show the gases are emitted below the levels required by international standards, and finally, results of the electrical and mechanical power generated by each of the biofuel mixtures, prove that power is not dependent on the mixtures used in the pilot thermal plant used. In conclusion, this work, shows the optimal biodiesel mixture in terms of the results obtained compared to pure diesel and according to the above, possible future work is established that can be carried out on the study with the mixtures between the ARP obtained with a vegetable oil used, to obtain a comparison and see if the effect can be useful to the environment because an alternative use could be given to the latter industrially produced oil.

**KEYWORDS:** Biodiesel production, refined palm oil, transesterification, ethanol, pilot thermal plant.

# CAPITULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

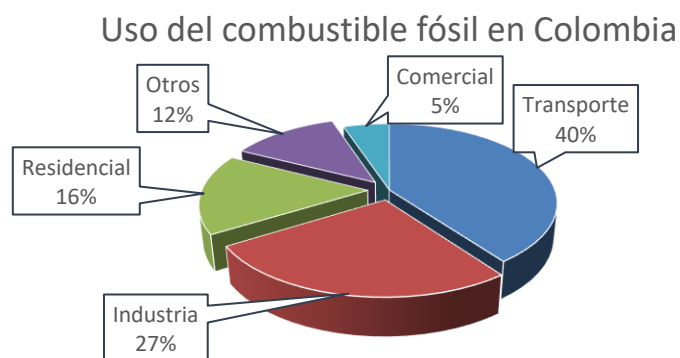
## 1.1.DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En reporte presentado por la British Petroleum (BP) respecto de las expectativas de producción de crudo a nivel mundial; Colombia presentó la tercera mayor caída en los últimos once años de producción en Latinoamérica respecto a las otras naciones productoras, debido a que el país bajó en un 3.9% su producción y el saldo de sus recursos probados de crudo es de tan solo 200 millones de toneladas, posicionándolo dentro los países con menores reservas petroleras en el mundo (Ver Figura 1). [10]



Gráfica 1. Reservas mundiales de petróleo 2019 [11]

Sin embargo, Colombia ha aumentado anualmente el consumo interno de combustibles fósiles para la generación eléctrica que en su mayoría se consumen en plantas que alimentan subestaciones rurales y en la generación de potencia con fuentes fijas generalmente en el sector industrial [12]. (ver figura 2)



Gráfica 2. Usos del combustible fósil en Colombia [13]

Lo que demuestra lo anterior es que en Colombia cerca al 66% del territorio Nacional no está conectada a la red principal de energía eléctrica; se encuentran 17 departamentos, 5 capitales departamentales, 54 cabeceras municipales y 1.262 localidades. El mayor porcentaje de energización de las Zonas No Interconectadas (ZNI) se encuentra en las cabeceras departamentales y municipales, que generalmente cuentan con generadores diésel o pequeñas centrales hidroeléctricas, en cuyo caso el 96,3% de la capacidad de generación es a partir del diésel [14].

Por lo tanto, en los lugares donde hay cobertura, el servicio es deficiente y costoso, en general se paga el doble del promedio por kWh en las ZNI y se recibe la mitad de horas de servicio, el 99% de las localidades tienen un servicio de menos de 6 horas al día [15]

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Colombia con la gran cantidad de embalses (23 embalses ubicados en las regiones de Antioquia, Caribe, Centro, Oriente y Valle) y con las altas reservas hídricas que pueden generar hasta 17000 GWh, pero que, por motivos técnicos o especificaciones de construcción de los embalses, no toda el agua contenida en los mismos puede ser utilizada para la generación eléctrica. [17]

Adicionalmente, Colombia tiene bastantes zonas que no tienen acceso a la energía eléctrica, por lo que se hace necesario utilizar fuentes fijas de generación de potencia cuyo consumo sea el de combustibles de bajo impacto ambiental y de origen renovable como lo son los biocombustibles; por lo tanto esta investigación procura evaluar alternativas tanto de materia prima como de condiciones de proceso que permitan producir un biocombustible amigable con el ambiente y que pueda ser solución a la diversificación del agro colombiano.

¿Estudiar el efecto de las mezclas entre ARP (Aceite Refinado de Palma) en la obtención de biodiésel, con Etanol en la reacción de transesterificación, demostrará que las características físicas y ambientales del combustible obtenido cumplen los estándares industriales después de ser probado en una planta térmica piloto?

## **1.3. OBJETIVO GENERAL**

Producir biodiésel a partir de aceite refinado de palma mediante transesterificación con etanol evaluando el efecto de una planta térmica piloto: caracterización física y medioambiental.

## 1.4. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Elaborar un biocombustible por transesterificación en la planta piloto de la Fundación Universitaria de Colombia - UNIAGRARIA a partir de Aceite Refinado de Palma y Etanol
- Caracterizar el biocombustible obtenido mediante algunas propiedades como el número ácido, la densidad, la viscosidad cinemática y el punto de flama, con la finalidad de comprobar que es óptimo para su aplicación.
- Realizar mezclas con el biodiesel obtenido para utilizarlo en la caldera de la planta térmica de la universidad ECCI, para caracterizarlo física y ambientalmente

## 1.5. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Muchas de las necesidades básicas del ser humano han podido ser resueltas gracias al desarrollo de tecnologías basadas en el petróleo como combustible debido a que es la base del desarrollo industrial, el transporte y la agroindustria. Sin embargo, la demanda de energía en el mundo está aumentando rápidamente por lo que se está produciendo un excesivo consumo de este tipo de combustibles fósiles. Por esta razón y porque las reservas de petróleo son limitadas, se están buscando alternativas a este tipo de combustibles [16].

La investigación en el uso de aceites vegetales y grasas animales como fuente para las aplicaciones de biocombustible ha recorrido un largo camino y es por esto que la industria está actualmente disfrutando de un crecimiento exponencial del uso de este combustible, sumado a las políticas públicas que alientan un mayor crecimiento a lo largo del tiempo [16].

Debido a este crecimiento, los sectores que pueden utilizar el biodiésel también están en aumento, tecnologías como los motores diésel ultralimpios o las celdas de combustible, en realidad representan más oportunidades que amenazas, para el desarrollo de combustibles alienados con la parte ambiental. Desde esta perspectiva, ya no se trata de si el biodiésel tendrá éxito; solo es cuestión de qué tan grande crecerá y qué tan pronto lo hará [17].

Por lo tanto, el uso de biocombustibles permite a los países diversificar su canasta energética y los hace menos dependientes de combustibles fósiles no renovables, trayendo al mismo tiempo efectos positivos sobre el medio ambiente al reducir el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero, y, al basarse en insumos agrícolas, puede tener efectos positivos sobre el desarrollo rural de los países [18].

El problema que motiva a realizar este proyecto es la aplicación de biodiésel en una planta estacionaria de generación eléctrica y su efecto ambiental y de consumo, además de fabricar y producir combustible a base de ARP y etanol con estándares internacionales para realizar las mezclas requeridas en la aplicación.

## **1.6. DELIMITACIÓN**

Este proyecto se lleva a cabo en la Fundación Universitaria de Colombia - UNIAGRARIA y la Universidad ECCI, ubicadas en la ciudad de Bogotá (Colombia), utilizando las plantas piloto de producción de biodiésel y planta térmica piloto de las mismas universidades respectivamente.

En el laboratorio de biodiésel de la Fundación Universitaria de Colombia - UNIAGRARIA, se realizará como primer paso la producción de biodiésel a escala laboratorio con aceite refinado de palma como materia prima base mediante transesterificación con etanol, para realizar como segundo paso la caracterización de la mejor mezcla entre materia prima y catalizadores para realizar como último paso la producción de 20 galones de combustible en la planta piloto destinada para tal fin.

Después de lo anterior, en la Universidad ECCI, se preparan siete (7) mezclas entre el biodiésel producido y diésel comercial para luego con la ayuda de la planta térmica piloto, caracterizarlas de cada una de las mezclas en cuanto a consumo y emisiones ambientales.

Por último, se verifica que la potencia generada por el combustible en la planta piloto sea la misma y de acuerdo a esto comparar los resultados con estudios similares en fuentes fijas y determinar cuál de las mezclas producidas es la mejor con respecto a las demás y con ello determinar si el biocombustible producido cumple con las normas ambientales de emisión de gases a nivel nacional.

## **1.7. LIMITACIONES**

Gracias al presupuesto gestionado por el grupo de investigación TEIN de la Universidad ECCI para la realización de este proyecto, se pudo realizar la corrida para la producción de 25 kg de biodiésel la Fundación Universitaria de Colombia - UNIAGRARIA pero en el momento de la caracterización del combustible solo se pudo realizar la caracterización del biocombustible en solo cuatro propiedades que fueron el número ácido, la densidad, la viscosidad cinemática y el punto de flama tanto a nivel laboratorio como a nivel de producción planta piloto lo que restringió la comparación completa del producto con la norma ASTM D 6751.

La materia prima, los insumos químicos, los equipos de caracterización físico-química, y los elementos de laboratorio químico, para la producción del combustible a escala

laboratorio están disponibles en el laboratorio de biodiésel de la Fundación Universitaria de Colombia – UNIAGRARIA, pero solo se dispone de la planta piloto de producción de biodiésel una única vez para la producción de los 25 Kg. requeridos para las pruebas en la planta térmica piloto.

Con la Fundación Universitaria de Colombia – UNIAGRARIA se establece un acuerdo de confidencialidad para temas de desarrollo y producción del biodiésel, mediante el cual no se permite mostrar toda la parte química de su elaboración y con permiso restringido se pudieron tomar algunas imágenes fotográficas de la planta piloto y de los equipos de caracterización del combustible.

La planta térmica piloto, está a disposición del maestrante las veces que se requiera dentro del horario laboral y programación asignada por la dirección de laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad ECCI, pero por temas de la pandemia COVID-19, no se pudo volver a ingresar para tomar de nuevo algunas imágenes fotográficas requeridas como complemento al documento.

El diésel comercial para realizar las mezclas con el biodiésel producido es suministrado por los maestrantes y como aporte adicional, el maestrante Jorge Guzmán L., prestará el equipo analizador de emisión de gases ambientales debidamente calibrado por entidad nacional aprobada por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) de Colombia para realizar las pruebas y calibraciones respectivas a la caldera de la planta térmica piloto.

## CAPITULO II. MARCO TEORICO

### 2. GENERALIDADES DEL BIODIÉSEL

Según la AFDC (ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER), "el biodiésel es un combustible biodegradable fabricado a partir de grasas animales, aceites vegetales o grasa de restaurante reciclada que puede ser renovable". Por esta razón, en los últimos tiempos, el biodiésel se usa en motores de encendido y compresión y en calderas de calefacción o producción de vapor [19].

El biodiésel es producido principalmente por una reacción llamada transesterificación, llevada a cabo entre un aceite y un alcohol en presencia de un catalizador, para obtener mono-alquil ésteres y glicerol, que luego se separan y se purifican [11]

Algunas desventajas de esta clase de combustible están en algunas de sus propiedades físicas, tales como el alto punto de congelación, su menor contenido energético con respecto al Diésel; y en propiedades químicas que hacen que baje su calidad aumentando las emisiones de NOx y aldehídos, y que por ser solvente debe mantenerse limpio para que no se contamine o pierda estabilidad. Con respecto a la parte económica, es relativamente costoso comparado con otros combustibles de origen fósil [20].

Pero sus ventajas son múltiples: es un reemplazo más limpio para el combustible diésel de petróleo, permite el desarrollo agrícola, la diversificación energética, el uso de residuos, tiene un mayor poder lubricante, reducción de emisiones de CO aumentando las emisiones netas de CO<sub>2</sub>, contiene una mayor cantidad de cetano (para mejorar el proceso de combustión), no contiene S, y es más seguro de transportar y almacenar [20].

El biodiésel es un líquido que varía su color entre el oro y el marrón de acuerdo con la materia prima utilizada, no se mezcla con el agua y tiene una baja presión de vapor y un alto punto de ebullición [11].

El empleo del biodiésel puede ser puro, designado como B100 o mezclado con el combustible diésel, designado como BXX, donde XX representa el porcentaje de biodiésel en la mezcla. La proporción más frecuente es B20, que representa un 20% de biodiésel y un 80% de diésel [21].

Las materias primas más frecuentes para la producción de biodiésel son los aceites de las oleaginosas de producción mundial, tales como colza, girasol, soja y palma africana, aunque también se están experimentando numerosas fuentes alternativas como son los aceites de fritura reciclados y las grasas animales. Además hay una gran expectativa



por lo que puedan ofrecer especies exóticas características de cada región, como son la *Jatropha* o las algas, entre muchas otras [22].

La energía del biodiésel procede del sol a través de la fotosíntesis de la biomasa. Sin embargo, para mantener la ventaja principal de su uso (es decir, una energía amiga del medio ambiente), factores limitantes como el uso extensivo de la tierra, riego, y las prácticas laborales (como la fertilización, control de malezas) deben ser tomados en consideración y ser reducidas a niveles mínimos. La implementación de prácticas agrícolas eficientes es de especial interés para preservar la fertilidad del suelo y reducir el uso de materias valiosas, tales como fertilizantes y agua [16].

## **2.1. RESEÑA HISTÓRICA DEL DESARROLLO DEL BIODIÉSEL**

La utilización del biodiésel no es algo nuevo porque su desarrollo data del siglo XIX cuando Rocherhier (1846) realizó la primera reacción química de transesterificación a partir de aceite de ricino para obtener glicol y que luego en el siglo XX, Rudolph Diesel (1912) utilizara para obtener un combustible a partir del aceite de cacahuete que utilizó en un motor de encendido por compresión [11]

Luego de estos experimentos iniciales y a través de su desarrollo en el siglo XX en la década del 70 surge la idea de utilizar el biodiésel para la reducción de emisiones SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub> y HC, mediante de la firma del tratado de aire limpio impulsado por la EPA (Environmental Protection Agency) en los Estados Unidos [11]

Después de esto, en la década del 80 y afianzando el tratado de aire limpio se desarrollan y se regulan los estándares de los aditivos del combustible (se aumenta la cantidad de oxígeno presente en las gasolinas y la reducción de azufre en los diésel) y algunos métodos de extracción de aceite [11].

Y en la última década del siglo XX, el biodiésel se convierte en alternativa para uso en vehículos con motor a diésel porque no influyen en el funcionamiento y disminuyen las emisiones contaminantes. Muchas plantas de refinación de aceite se convierten en plantas productoras de biodiésel con altos costos debido a materias primas de baja calidad y tratamientos a realizar a subproductos resultantes [11].

Finalmente, en nuestro siglo se han desarrollado estudios técnico económicos para perfeccionar el rendimiento y costos de producción del biodiésel, desarrollo de nuevas materias primas como el aceite de fritura usado (AFU) o basuras para mejorar la calidad ambiental del mundo a partir de los desperdicios.

En la figura 1, se observa de manera esquemática y de resumen, el desarrollo del biodiésel.

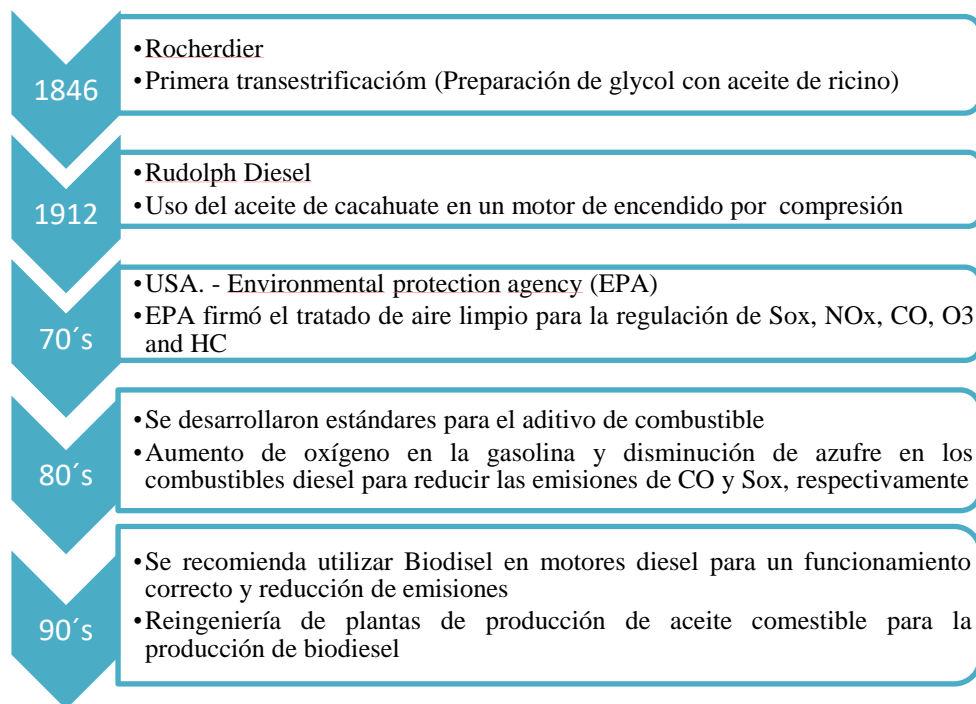


Figura 1. Esquema del desarrollo del biodiésel {Formatting Citation }

## 2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL BIODIÉSEL

En la tabla 1 se muestran las propiedades físicas del biodiésel a tener en cuenta cuando se produce biodiésel

Tabla 1. Características físicas del biodiésel

BIODIÉSEL – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Gravedad específica	0.88
Viscosidad cinemática at 40° C	4.0 to 6.0
Número de cetano	47 to 65
Poder Calorífico Superior, Btu/gal	127.960
Calor específico inferior, Btu/gal	119.550
Densidad, lb/gal al 15.5°C	7.3
Carbono, % peso	77
Hidrógeno, % peso	12
Oxigeno por dif. Peso %	11
Punto de ebullición, °C	315 - 350
Punto de flama, °C	100 - 170
Sulfuros, %peso	0.0 to 0.0015
Punto de nube, °C	-3 to 15
Pour point, °C	-5 to 10

Fuente: [19]

### 2.3. COMPARATIVO ENTRE DIÉSEL Y BIODIÉSEL

En la tabla 2, se observan las propiedades físicas del diésel comparadas con las del biodiésel según la norma ASTM D 6751.

**Tabla 2. Diésel vs. Características del biodiésel**

Propiedad	Unidad	Diesel	ASTM D 6751
Densidad a 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	850	875-900
Viscosidad a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2.6	1.9-6.0
Punto de llama	°C	70	>130
Pour point	°C	-20	-
Contenido de agua	°C	0.02	<0.03
Contenido de ceniza	%	0.01	<0.02
Residuos de carbón	%	0.17	-
Contenido de azufre	%	-	0.05
Valor ácido	mg KOH/g	0.35	<0.8
Valor iónico	-	0.35	-
Valor de saponificación	-	-	-
Poder calorífico	MJ/kg	-	-
Número de cetano	-	42	-
Punto de nube	°C	46	-
Lubricidad	µm	-	-
Periodo de inducción (IP)	hours	-	3.0 min

**Fuente:** [24]

El biodiésel tiene mejores propiedades lubricantes y la misma cantidad de cetano que el diésel de bajo contenido de azufre, lo que permite mejorar la combustión cuando se agrega al diésel común [24]. También causa mucho menos daño que el diésel de petróleo si se derrama o libera al medio ambiente y es más seguro que el diésel de petróleo porque es menos combustible porque el punto de inflamación para el biodiésel es más alto que 130 ° C, comparado con 52 ° C para el diésel del petróleo [19].

El poder calorífico del biodiésel varía entre 37 MJ / L y 48.6 MJ / L (9% menos que el Diésel) dependiendo de la materia prima utilizada [11].

Desde el punto de vista de toxicidad, el biodiésel (formado por cadenas hidrocarbonadas que forman ésteres con dos átomos de oxígeno) es biodegradable y biológicamente activo, en comparación con el diésel convencional (formado por una mezcla de alcanos, alcanos ramificados, cicloalcanos e hidrocarburos aromáticos) que es difícil de degradar. Por otro lado, por el nivel de inflamabilidad el biodiésel es más seguro que el diésel debido a que el punto de llama es mayor [17].

La eficiencia de combustión del biodiésel es más alta que el diésel debido al aumento de homogeneidad de la mezcla oxígeno con el combustible durante la combustión. El biodiésel contiene 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre. En cuanto a las cualidades lubricantes del biocombustible, estas hacen que pueda extender la vida útil de los motores debido a su mejor calidad comparada con la del combustible de diésel de petróleo, mientras el consumo, encendido, rendimiento, y el par del motor (torque) varían muy poco respecto a sus valores normales [17].

De acuerdo con esta comparación, se puede establecer que:

- La densidad y la viscosidad del biodiésel son mayores que el diésel; esto significa que puedes obtener más energía térmica [19]
- El número de cetano es mejor en biodiésel, por lo que la combustión del motor es mejor porque las emisiones de CO se reducen debido a la demora de encendido [11]
- El menor contenido de azufre en el biodiésel permite una reducción en el desgaste del motor eliminando los depósitos del mismo [24]

## 2.4. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

### 2.4.1. TRANSESTERIFICACIÓN

Es el proceso químico utilizado más frecuentemente en la producción comercial de biodiésel (figura 2), la reacción de ésteres (monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos) con alcohol (metanol o etanol) se puede acelerar con catalizadores homogéneos (ácido o base) o heterogéneos (ácido, base, o una enzima) convirtiendo los ésteres en alquilesteres (esteres metálicos derivados), glicerina y alcohol residual (metanol o etanol) de acuerdo al que se haya utilizado. Generalmente se usan catalizadores alcalinos homogéneos, especialmente hidróxido de potasio y de sodio porque proporcionan mayor velocidad de reacción que la conversión de los catalizadores ácidos para la transesterificación de triglicéridos en biodiésel [25], [26].

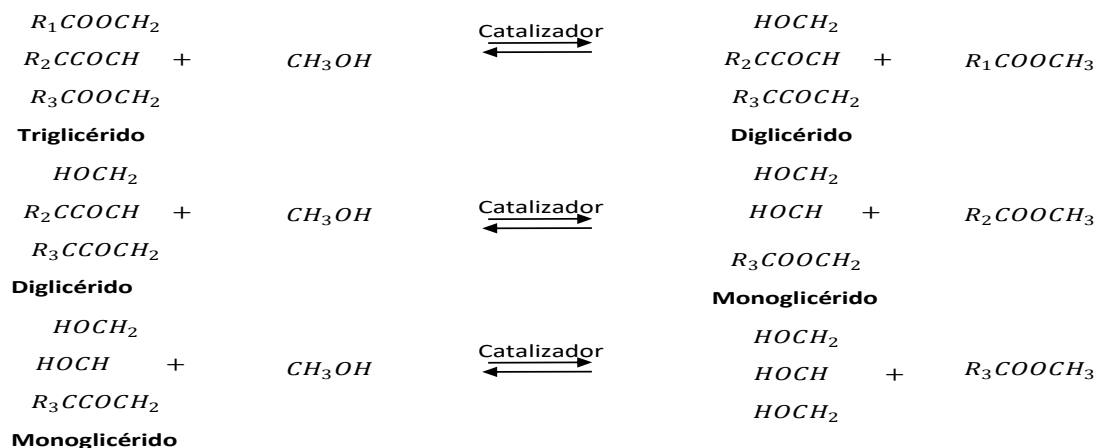


Figura 2. Reacción química de la transesterificación [27]

La transesterificación es una reacción lenta y es una reacción reversible que requiere una mayor cantidad de alcohol para la formación de productos. Cuando se usa metano, se requiere una relación molar de 6: 1 para una conversión alta de triglicéridos a ésteres, en comparación con el uso de etanol que requiere una realización molar de 9: 1. Y se requiere temperatura; los rangos de 20 ° a 90 ° C, podrían obtener un buen rendimiento de reacción establecido entre 80% (1 min) y 97% (1 hora) [11].

En la figura 3, se muestra como es el proceso de fabricación del biodiésel a partir de aceites vegetales, utilizando como catalizadores al etanol y soda caustica a escala de laboratorio. Advierte claramente sobre el cuidado que se debe tener en el cálculo de la acidez del aceite con el fin de utilizar el catalizador adecuado en cuanto a clase y cantidad y recomienda en la etapa de purificación del aceite realizar el lavado de agua mediante destilación [17].

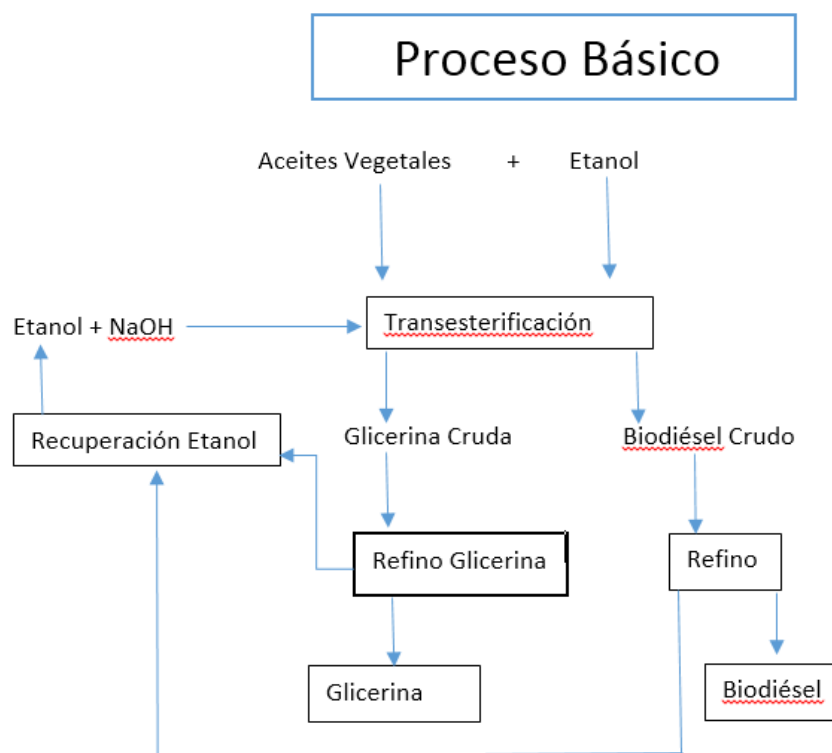


Figura 3. Diagrama del proceso de transesterificación [autores]

## 2.4.2. OTROS MÉTODOS

En el trabajo realizado sobre caracterización de biodiésel con aceite de palma y con aceite reciclado se produce el combustible a nivel laboratorio mediante dos métodos: 1. Proceso Batch (discontinuo) y 2. Proceso continuo con un reactor helicoidal. En la comparación se obtiene que el reactor helicoidal produce mejores características en el

combustible superando a el realizado con el primer proceso porque “aprovecha la sinergia producida por el efecto de las microdiscontinuidades originadas por los pulsos de las bombas y el cambio constante de dirección de las fuerzas de flujo en los diferentes puntos de la trayectoria helicoidal a la que se ve obligado el fluido” [22]

Por otro lado, también existen métodos para acelerar la reacción de transesterificación: (1) uso de microondas y (2) uso de ultrasonido. El primero, mejora la productividad mediante el calentamiento, pero puede generar explosiones por sobrecalentamiento. "Las microondas son radiación electromagnética no ionizante, que no causa cambios en la estructura molecular, sino que produce movimiento molecular, por migración de iones y rotación de dipolos, que generan fricción por colisiones moleculares que hacen que el material se caliente" [28]. El segundo, reduce el tiempo de reacción utilizando ultrasonido de baja frecuencia (28 y 40 kHz) y también reduce la cantidad de catalizador requerida porque aumenta la transferencia de masa y la velocidad de las reacciones químicas. Sin embargo, ambos requieren un mayor conocimiento para permitir su desarrollo [28].

Finalmente, en la producción de biodiésel con de aceite de fritura como materia prima y butanol como catalizador mediante la aplicación de métodos biotecnológicos (se utiliza un biocatalizador, lipasa: Lipozyme RM IM), arroja que las condiciones óptimas para la producción del biocombustible son: 20 ° C de temperatura, butanol y aceite molar - 3: 1, 13% de catalizador y 5.18% de agua durante 30 horas. Como aporte se encuentra que la reacción de transesterificación es más eficiente con etanol o con butanol por encima del metanol y el aditivo de agua reduce la cantidad de ésteres en el biodiésel [29].

### 2.4.3. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

Los reactores que utilizan el principio de cavitación de impulso magnético de alta frecuencia han permitido obtener algunas ventajas importantes: [30]

1. Puede usar aceite refinado o sin refinar, grasas mezcladas con aceite, aceite ácido, desechos de plantas y animales sin la necesidad de ajustar el reactor
2. Reacción de un solo paso que reduce el tiempo de reacción en un rango de 8 a 10 veces menos
3. Se eliminan los procesos de refinación de petróleo, lavado y secado de biodiésel
4. La recuperación de alcohol no es necesaria porque con esta tecnología, la cantidad de alcohol utilizada para la reacción se ajusta con precisión a la composición estequiométrica, es decir, el volumen mínimo. Se ahorra energía eléctrica, se eliminan los desechos mediante la recuperación de alcohol y se evita el peligro de explosión.
5. Reacción a baja temperatura porque el proceso tiene lugar en el reactor a nivel molecular. Todos los componentes están expuestos a impulsos de cavitación dirigidos

magnéticamente. "Las moléculas de ácido graso se dividen usando microexplosiones; esto da como resultado una disminución de la viscosidad, un aumento del número de cetano, una mejora en los parámetros energéticos del combustible futuro y una aceleración considerable y una mejora de la calidad de la reacción de esterificación. Debe notarse que la reacción tiene lugar a temperatura ambiente y que no hay necesidad de calentar el aceite "[30].

6. El equipo utilizado es 10 veces más pequeño que los de una planta convencional

**Tabla 3. Características de las plantas BIOSMART**

PLANTA BIODIÉSEL BIOSMART CT6	
Productividad	6000 L/H
Procesadores	6
Potencia nominal	187 KW
Espacio ocupado	5 m x 3.7 m

Fuente: [30]

Este tipo de equipo es preciso en su dosificación (materia prima y componentes químicos), puede regular el flujo y la presión de la salida del sistema y también tiene un sistema de mezcla preliminar para fabricar el combustible con altas especificaciones técnicas.



**Figura 4. Mini-planta de biodiésel [30]**

## 2.5. MATERIAS PRIMAS PARA EL BIODIÉSEL

Los aceites y las grasas son las materias primas más utilizadas en la producción de biocombustible a la cual se le adicionan un alcohol y un catalizador para transformar los triglicéridos del aceite en ésteres alquílicos [31].

### 2.5.1. ACEITES Y GRASAS

Los aceites y las grasas están principalmente formados por triglicéridos que son el resultado de la unión de ésteres de ácidos grasos con un glicerol. A su vez, los triglicéridos están conformados por un mol de glicerol y tres moles de ácidos grasos (AG). Cuando los tres moles de AG son iguales en el triglicérido se les conoce como triglicérido simple pero cuando los AG son diferentes se define como triglicérido compuesto. Los triglicéridos luego se unen a una molécula de glicerina (contiene tres grupos OH) razón por el cual el aceite o la grasa puede estar de forma mono, di o triesterificada por los ácidos grasos; y de acuerdo a los AG que conforman los triglicéridos, la longitud de la cadena de carbonos e hidrógenos puede variar al igual que los tipos de enlaces de estas cadenas volviendo a las grasas y aceites saturados o insaturados (dobles enlaces) [31].

**Tabla 4. Materias primas de biodiésel**

<b>Aceites Vegetales</b>		
<b>Convencionales</b>		<b>Alternativos</b>
Aceite de Colza	Aceite de ajonjolí	Aceite de Crambe abyssinica
Aceite de Algodón	Aceite de soja	Aceite de Cynara cundunculus
Aceite de coco	Aceite de higuera	Aceite de Jatropha curcas
Aceite de girasol	Aceite de oliva	Aceite de Pogianus
Aceite de palma	Aceite de Maíz	Aceite de Brassica carint
		Aceite de Camelina sativa
<b>Aceite de semillas alteradas genéticamente</b>		
Aceite de Girasol de alto oleico		
<b>Grasas animales</b>		
Sebo de búfalo		Sebo de vaca
Sebo de Cerdo		
Grasa de pescado		Grasa de Pollo
<b>Aceites usados de fritura</b>		
<b>Aceites de otras fuentes</b>		
Aceites de micro algas		Aceite de producciones microbianas

Fuente: [31]

De acuerdo a la tabla 4, los aceites vegetales convencionales y las grasas animales son las principales fuentes de obtención de la materia prima que se requieren para producir el biodiésel. Pero existen alternativas como los aceites vegetales de plantas oleaginosas que no están en la cadena alimentaria humana o los aceites de semillas alteradas genéticamente. También encontramos los AUF, los aceites de microalgas y aceites de obtenidos de producción microbiana. Lo importante de la materia prima es que esté compuesta por triglicéridos para que puedan emplearse en la producción de biodiésel.



### 2.5.1.1. ACEITE DE PALMA

El aceite de palma se extrae de la capa intermedia (mesocarpio) del fruto de la semilla de la palma africana (*Elaeis guineensis* jacq) mediante procedimientos de tipo mecánico. Es fuente natural de antioxidantes (carótenos y vitamina E) y su aporte nutricional está en la elaboración de margarinas, aceites para mesa y cocina, además de grasa para elaboración de dulces para repostería y confitería, porque están compuestos de ácidos grasos saturados e insaturados [32].

Otros usos del aceite de palma están en la producción de combustibles, detergentes, cosméticos, plásticos, farmacéuticos, etc., debido a que sus características cumplen con los requerimientos de estos productos. Debido al aumento en sus usos la producción de este aceite está en aumento a nivel mundial por lo que lo convierte en materia prima de primer nivel para el desarrollo industrial [32].

El aceite de palma está compuesto por triglicéridos que contienen AG insaturados, saturados e hipercolesterolémicos (no aumentan en colesterol en la sangre). Los AG insaturados que lo componen son: Oleico (36-44%) y el linoleico (9-12%). Los AG saturados que lo componen son: Palmítico (39,3-47,5%) y esteárico (3,5-6%). Y los AG hipercolesterolémicos que lo componen son: láurico (<5%) y mirístico (0,5-2%) [32]. En la tabla 5 se muestran algunas propiedades físico-químicas del aceite de palma.

Tabla 5. Propiedades físico-químicas del aceite de palma

Características	Ésteres Obtenidos	Ésteres Étlicos, Patrón
$G^{20}$ (densidad relativa)	0,871	0,868 – 0,878
$\eta^{20}$ (índice de refracción)	1,4462	1,4455
Viscosidad a 40° C (cSt)	6,0	4,97 – 5,7
Índice de saponificación (mg KOH/g)	192,2	202,9
Valor ácido (mgKOH/g)	0,1	0,0
P. molecular medio (g/mol)	291,8	276,4
Apariencia (visual)	Translúcido	Translúcido

Fuente: [33]

### 2.5.2. CATALIZADORES

Para aumentar la velocidad de la reacción de transesterificación, que por lo general es lenta a condiciones normales, es necesario el uso de catalizadores que pueden ser de varios tipos como lo son: catalizadores homogéneos alcalinos y ácidos, enzimáticos o heterogéneos [31].

### **2.5.2.1. Catalizadores alcalinos o básicos**

Este tipo de catalizadores hacen que las reacciones se produzcan a altas velocidades bajo condiciones normales o moderadas de presión y temperatura, lo que los convierten en unos de los más utilizados en la industria. A nivel teórico cuando estos catalizadores se utilizan en reacciones que utilizan como materia prima aceites reutilizados que contienen agua y ácidos grasos libres se suscita la formación de jabones lo que conlleva a una posterior etapa de purificación. [31]

### **2.5.2.2. Catalizadores ácidos**

Los catalizadores ácidos son utilizados convencionalmente en la producción de biodiésel cuando se realiza transesterificación para su producción, siendo el ácido sulfúrico el más utilizado cuando se utiliza como materia prima aceite con alto grado de AG pero la reacción no es lo suficientemente rápida como para utilizarlo en un procesos de producción a nivel industrial [31].

### **2.5.2.3. Catalizadores enzimáticos**

Los catalizadores enzimáticos tienen la propiedad de ser amigables con el medio ambiente porque las reacciones se realizan a temperaturas más bajas que los anteriores (20 a 30°C), se pueden reutilizar y requieren menos procesos de purificación. En nuevas investigaciones se han utilizado este tipo de catalizadores para la transesterificación dando como resultado que la velocidad de reacción es más lenta que con catalizadores alcalinos, las enzimas sufren inactivación con la presencia de glicerina y alcohol pero la glicerina que se produce es limpia y no suscitan la formación de jabones [31].

### **2.5.2.4. Catalizadores Heterogéneos**

Los catalizadores heterogéneos tienen la característica de estar en una fase diferente a la de los dos reactantes. Recientemente los catalizadores heterogéneos que se han usado con fase activa en la transesterificación son los que contienen óxidos metálicos principalmente soportados sobre alúminas y silicatos [31]. Entre las principales ventajas de este tipo de catalizadores se encuentran que simplifican y hacen más fácil el proceso de purificación porque simplifican la separación de productos y reactivos [17], se pueden reutilizar porque las enzimas son más estables porque se pueden regenerar un mayor número de veces [31]. Y como desventajas se tienen que para reacciones exotérmicas es muy difícil el control de la temperatura, la transferencia de masa debido a que forma una tercera fase distinta a la de los reactantes. Por lo anterior este tipo de catalizadores no han sido adoptados industrialmente [31].

### 2.5.3. ALCOHOLES

Los alcoholes utilizados como reactivos en el proceso de transesterificación son diversos, pero lo de más común utilización son el metanol y el etanol, aunque también son utilizado en menor escala, alcoholes de cadena larga como propanol, butanol, ISO-propanol. A diferencia de los dos primeros estos alcoholes son más costosos [31].

El metanol proviene de fuentes fósiles, requiere de cuidados en su manipulación y medidas de seguridad para el control de incendios. En cuanto a sus propiedades permite “conversiones de equilibrio mayores debido a que favorece la formación del intermediario metóxido altamente activo, además los metilésteres (Biodiésel del metanol) son menos viscosos que los etilésteres del etanol facilitando la combustión en motores diésel principalmente en climas fríos” [31].

El etanol se obtiene de fuentes renovables, es más fácil de manipular comparado con el metanol y es más económico. Entre sus características está que es más soluble en aceite que el metanol presentando mejor transferencia de masa en la reacción de transesterificación [31].

En la tabla 6, se exponen las propiedades del biodiésel FAME (Éster metílico de ácido graso) y del biodiésel FAEE (Ester etílico de ácido graso)

**Tabla 6 Propiedades biodiésel producidos con metanol y etanol**

<b>Propiedad de Combustible</b>	<b>Unidades</b>	<b>Árbitro</b>	<b>FAME</b>	<b>FAEE</b>
Densidad a 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	834	887	878
Viscosidad Cinemática a 40°C	cSt	2,7	5,16	4,9
Calorífico bruto	MJ/Kg	45,5	39,7	39,5
Bajo valor calorífico	MJ/Kg	42,5	36,6	36,8
Número ácida	Mg de KOH/g	0,10	0,5	0,27
Carbono (C)	% p/p	86,1	76,9	77,4
Hidrógeno (H)	% p/p	13,9	12,1	12,2
Oxígeno (O)	% p/p	0	10,9	10,4
El contenido de azufre	ppm/peso	34	0	0
Contenido de agua	ppm/peso	57	466	420
Peso molecular		211,7	293,2	306,7
Índice de yodo		-	97,5	105,7

Fuente: [31].

## 2.5.4. EFECTO DE LAS EMISIONES EN LA ATMÓSFERA

Los gases de efecto invernadero son aquellos gases que admiten que la radiación solar penetre hasta la superficie terrestre, atrapando la radiación infrarroja ascendente emitida por la Tierra, o por el contrario escaparía al espacio. La concentración atmosférica de estos gases es baja, pero tienen una importancia fundamental en el aumento de la temperatura del aire próximo al suelo, es por ello, que se debe evitar en la medida de lo posible su emisión. [34]

Cuando se emite CO<sub>2</sub> se afirma que la emisión contribuye a que la Tierra tenga una temperatura tolerable para el desarrollo de la vida y junto con el vapor de agua mantienen la temperatura media de la Tierra, porque sin ellos sería de unos -33°C, lo que haría inviable la vida [35]. El exceso de emisiones de CO<sub>2</sub> realza el efecto invernadero, lo que reduce la dispersión de calor acumulado por la radiación solar en la superficie del planeta hacia el espacio y provoca un mayor calentamiento de la Tierra. De modo que el problema surge cuando el efecto invernadero crece por la emisión excesiva de ciertos gases, como el dióxido de carbono y el metano, debido principalmente a la actividad humana.

Ahora, cuando la emisión se le suma CO, la cantidad generada de este gas por un equipo de combustión, depende del balance entre el proceso de formación (reacciones rápidas) y la oxidación del mismo (reacciones lentas), siendo ambas concentraciones muy activas a temperatura elevada. Por tanto, se deben buscar procesos donde los tiempos de residencia de CO sean del orden de segundos, para que las reacciones del CO alcancen el equilibrio y la cantidad de la emisión en los humos sea prácticamente nula. [36].

Por otro lado, la emisión de CO tiene que ver directamente con la temperatura que se alcanza en el proceso de combustión [37] debido a que puede formarse este gas por dos motivos: haber zonas con defecto de aire en el frente de llama o zonas con una mala mezcla de combustible y comburente, (problemas de pulverización y del proceso de mezcla), haciendo que la emisión de CO tenga un comportamiento general similar para todos los combustibles[36]. En consecuencia, la emisión de CO se intensifica a medida que aumenta el aire de entrada.

Pero también, las emisiones de NO son importantes ya que una vez presente en la atmósfera se oxida y da lugar al NO<sub>2</sub> siendo este último la principal forma química con efectos adversos sobre la salud (inflamación de las vías aéreas, afecciones de órganos, como hígado o bazo, o de sistemas, como el sistema circulatorio o el inmunitario, que propician a su vez infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias) y sobre el ambiente (acidificación y eutrofización de ecosistemas, afecciones metabólicas, limitación del crecimiento vegetal). Los procesos de acidificación pueden también afectar a las edificaciones [38].

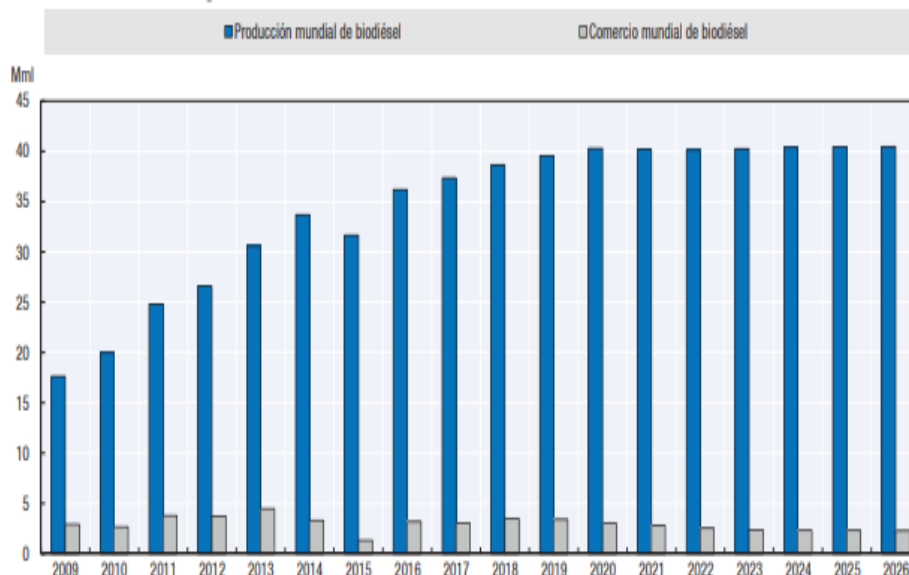
Igualmente, los NOx contribuyen igualmente de forma secundaria a la formación de partículas inorgánicas (por ser precursores del ácido nítrico, HNO<sub>3</sub>, y por tanto del nitrato, NO<sub>3</sub>- en partículas), y también actúan como precursores de la formación de ozono (O<sub>3</sub>) y de otros contaminantes fotoquímicos (por ejemplo, al reaccionar con compuestos orgánicos volátiles, COVs), lo que potencialmente agrava las consecuencias mencionadas sobre la salud y el medio ambiente y conlleva efectos sobre el clima.

Otro tema importante en la emisión de gases a la atmósfera es cuando en la combustión existe exceso de aire, lo que hace que se produzca en los gases emitidos un aumento en el volumen de los gases de combustión húmedos produciendo un efecto de dilución reduciendo las proporciones relativas de los constituyentes de este [39].

## 2.6. ESTADO DEL ARTE

### 2.6.1. INTERNACIONAL

La producción mundial de biodiésel ha tenido un aumento exponencial desde su primera producción industrial desde hace unos 20 años estimada los 17.000 millones de litros con una tendencia al crecimiento de manera exponencial en donde Europa, Estados Unidos y Brasil son los mayores productores de este tipo de combustible, siendo la colza, la soya y la palma las principales materias primas de los aceites vegetales usados en la producción de biodiésel y que tienden a usarse de una manera más amplia en Oceanía y Asia en donde son líderes China e India [22].



Gráfica 3. Estimación de la producción mundial de biodiésel. [40]

Se prevé que para 2026 esta producción mundial llegue a 40.5 Mml equivalente a un aumento del 13% comparada con la producción del 2016, comportamiento que se puede

observar en la gráfica 3 y cuya estimación mundial prevé que el uso del biodiésel deberá disminuir en los países desarrollados y aumentar de manera constante en los países en desarrollo [40].

También en la gráfica 3, se puede observar que el comercio del biodiésel retrocederá 20% o 0.9 Mml durante los próximos 10 años, puesto que la mayoría de los países con norma obligatoria u objetivo de biodiésel los cubrirán internamente. Pero pese a los requerimientos de sostenibilidad, las necesidades de importación serán importantes en la Unión Europea en el periodo previo a 2020 y disminuirán a partir de entonces. Estados Unidos importará biodiésel para cubrir la norma obligatoria avanzada y Argentina será el proveedor preferido, debido a la decisión de la EPA (agencia de protección ambiental) que permite que los productores argentinos de biodiésel cumplan los requisitos de mantenimiento de registros de la RFS2 (Renewable Fuel Standard) [40].

El estado actual de la producción de biodiésel en la Unión Europea (UE), cuyos objetivos a través de la utilización de fuentes de energía renovables quieren lograr: (i) lucha contra el cambio climático; (ii) reducir las cargas ambientales locales; (iii) crear empleos e ingresos en una UE que se incrementa a 25 países miembros; y (iv) contribuir a un suministro seguro de energía. Estos objetivos se han estado logrando debido la voluntad política de cumplimiento de regulaciones que sobre este tema proponiendo aumentar la producción y el uso de energía renovable estimulando las directivas fiscales y de promoción energética otorgando a los países miembros dio la posibilidad de liberación de impuestos para los biocombustibles como requisito previo para alcanzar los objetivos del plan de acción; pero para esta reducción se requirieron informes exhaustivos desde el cultivo y la producción de la materia prima, hasta el final en el uso en los biocombustibles [41]. La FAO indica que en Europa llegará a su nivel más alto de producción este año con 14.6 Mml de biodiésel asegurando el nivel de políticas de la unión europea cumpliendo con la cuota promedio del 6.5% de combustibles tipo diésel.

En cuanto a Estados Unidos según resoluciones y normativas propias aumentarán el nivel de producción de 7.9 Mml a 9.25 Mml a pesar de que el uso adicional del etanol se encuentra limitado por la barrera de mezcla. En consecuencia, el uso del biodiésel deberá bajar alrededor de 5%, pero en un contexto de baja en el consumo de diésel. Se estima que la cuota de biodiésel en combustibles tipo diésel en términos de volumen aumentará 4.43% para 2026 [40].

Por otro lado, en un artículo resumen sobre el escenario de utilización de aceite usado para la producción de biodiésel en Irán se expone que el modelo puede ser adoptado por países con similar infraestructura y situación geográfica, en donde las condiciones de consumo y recursos energéticos están aumentando. Este país a pesar de ser líder en la producción de combustibles fósiles, esta producción no alcanza para satisfacer sus necesidades propias (el consumo de energía es de 3107536 GWh para el 2015, lo que

equivale al 2% de la energía del mundo) y con un problema adicional como es el del bloqueo económico por parte de EU, debió comenzar a buscar nuevas alternativas de desarrollo que no dependan de esta producción y apostó por la producción de biodiésel a partir de aceite usado. Otro problema en Irán es que su tasa de natalidad anual que crece a un ritmo del 2.5%, lo que hace que este país haya comenzado a importarlo pues la dependencia de los combustibles fósiles por parte del transporte es alarmante (99.64%) comparado con el resto del mundo (56.85%). Para esto, el gobierno de Irán eliminó a partir del 2010 todos los subsidios sobre el combustible, prohibió la importación de vehículos con tecnologías antiguas y produjo motores para utilizar combustibles altamente refinados con lo que reducirá las emisiones en un 35% a 2019 y adoptó un programa de utilización de materias primas de desechos hasta 2025 para alcanzar las metas propuestas. Adicionalmente Irán apuesta por la producción de biodiésel a partir de aceite usado alcanzando precios de 0.6 USD/L comparado con el 0.86 USD/L de petrodiésel, obteniendo optimización de uso de esta materia prima y un producto de buena calidad. Tan exitoso ha resultado su programa que la UE tiene un programa similar al de Irán para la utilización de esta materia prima junto con Canadá y Australia [42].

Finalmente, y de acuerdo a la motivación de este proyecto, la bioenergía o la generación de electricidad a partir de biomasa es una opción sostenible y renovable para la reducción de la demanda de combustibles fósiles en el sector eléctrico. Este tipo de combustibles ofrecen el beneficio de ser fáciles de transportar y de almacenar, ya sea en forma de gránulos, chips, entre otras. En 2017, se produjeron 596 TWh de bioenergía a nivel mundial, lo que representa un aumento de 25 TWh (+ 4%) sobre el año anterior. Entre el año 2000 y el año 2017, la producción de bioenergía aumentó en 3.6 veces. El 65% de la generación de bioenergía provino de biocombustibles sólidos primarios, el 19% provino de plantas combinadas de calor/energía, termoeléctricas y residuos industriales, el 14% por biogás y tan solo el 2% por biocombustibles líquidos los cuales se adaptan en mejor forma al sector del transporte (Ver tabla 7). [43].

**Tabla 7. Generación global de Energía por biomasa**

Año	Total	Desechos urbanos	Residuos industriales	Biocombustibles sólidos	Biogás	Biocombustibles líquidos
2000	164	34,3	15,3	102	13,1	0
2005	226	46,2	11,7	145	21	1,98
2010	360	62,4	20,4	226	46,4	5,07
2015	517	72,8	30,2	324	82,7	7,62
2016	571	71,9	36,5	369	84,7	8,07
2017	596	74,1	40	389	86,3	6,68
Unidades en TWh						

Fuente: [43]

Cabe anotar que continentes como Asia y Europa se reconocen como los mayores productores de energía de biomasa en el mundo, pues su generación de bioenergía

equivale a 212 TWh y 218 TWh respectivamente. La mayor parte de esta generación se realizó en forma de biocombustibles sólidos como pellets, astillas de madera, etc. Entre los desechos, Europa produce la mayor parte de bioenergía de los desechos urbanos (63%) y casi 3/4 de la producción mundial de bioenergía a partir de biocombustibles líquidos y biogás se produce en Europa. Otro dato importante a destacar es que Asia es el líder mundial en la producción de electricidad a partir de bioenergía, el 64% de toda la biomasa producida, se utiliza para este fin, mientras que Europa y América utilizan solo el 18% [43]. Por lo tanto, se puede deducir de esta información, que valdría la pena invertir en biomasa para que sea convertida en energía eléctrica como una manera de incentivar este mercado y reducir las emisiones atmosféricas.

### 2.6.2. LATINOAMERICANO

Argentina es el mayor exportador mundial de harinas oleaginosas y el tercer mayor exportador de semillas oleaginosas, así como de aceites comestibles, principalmente soja y girasol. Además, está clasificado como el cuarto mayor productor de semillas oleaginosas. En consecuencia, existe un enorme potencial para la producción de biodiésel. Desafortunadamente, la actual crisis socioeconómica del país está obstaculizando las decisiones de inversión, que es la principal barrera para cualquier desarrollo significativo de biodiésel. Hay siete unidades de producción de biodiésel existentes con capacidades que van de 10 a 50 t / d, y al menos 11 proyectos, que van desde cooperativas de pequeños agricultores hasta la producción a gran escala con una inversión de US \$ 30 millones, que están pendientes. En la actualidad, sin embargo, solo una unidad cervecera doméstica de pequeña escala está produciendo efectivamente [41].

Brasil en 2002 anunció el programa PROBIODIÉSEL (Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiésel), con el objetivo de establecer el marco regulatorio para el desarrollo y la producción de biodiésel. El programa está coordinado por el Ministerio de Ciencias y Tecnología, la Secretaría de Tecnología y Política de Empresa. Además de la producción de éster metílico de soja (SME), se está considerando el desarrollo de un éster etílico de la soja (SEE) porque Brasil tradicionalmente tiene una gran producción nacional de bioetanol a partir de la caña de azúcar. El bioetanol se ha utilizado como biocombustible líquido para fines de transporte durante muchos años. Tanto SME como SEE se usarán como mezclas B-5 en diésel fósil. La industria de verduras (ABIOVE: Associação Brasileira de das Indústrias de Óleos Vegetais) proporcionará 80,000 L sin cargo para realizar pruebas de combustible. Actualmente hay cuatro empresas capaces de comenzar la producción de biodiésel, pero debido a que todavía no se ha autorizado su comercialización, actualmente no hay una planta dedicada a la producción de biodiésel [41].



Se estima que en Brasil y Argentina aumentará para 2026 la producción de biodiésel en 5.4 Mml y 1.8 Mml, respectivamente, debido a los recién anunciados aumentos en las normativas internas [40].

En contraste con lo anterior, el uso del aceite vegetal usado en Brasil, muestra cual es la composición de la transesterificación alcalinizada con Waste Cooking Oil (WCO) y el proceso de limpieza del mismo con su respectiva caracterización. Algunos inconvenientes que tiene el WCO en cuanto a los ácidos grasos libres y el agua contenida porque produce inconvenientes de estabilidad del combustible y dificultad en la reacción de transesterificación. Económicamente, dice que, el WCO es la materia prima más barata de todas para la producción de biodiésel y hace referencia a que se han adoptado políticas de recolección en países como China, Emiratos Árabes, Japón y Estados Unidos. Como aporte de la investigación se muestra que es una solución a la pobreza en Brasil porque como estrategia de inclusión social erradicaría la pobreza extrema en un 20% si se incluye este proceso en la cadena productiva del país, lo que hace pensar que sería una estrategia para los demás países de América Latina [44].

Siguiendo la línea de las investigaciones anteriores, en el Perú, el desarrollo del biodiésel propone el uso de este combustible para reemplazar el petróleo residual 6 (R6), con el fin de reducir la emisión de gases contaminantes y un considerable ahorro económico. Para demostrar esto se realiza una investigación descriptiva de la Cadena Productiva de biodiésel en el país y se dan cuenta que el eslabón más débil de la cadena está en el sector agrícola, debido principalmente a la escasez de tierras, los elevados costos de transporte y la incertidumbre de la productividad agrícola. Para demostrar su hipótesis, realizan los cálculos de la combustión completa del biodiésel en una caldera, el análisis de la combustión del combustible y la comparación entre los dos combustibles con el análisis medioambiental, mostraron que el biodiésel es superior y recomiendan realizar monitoreos periódicos iniciales para el cambio. La conclusión obtenida es que el estado peruano debe implementar mecanismos e instrumentos de gestión ambiental como Estrategia Nacional para que este tipo de industria se desarrolle, la actividad agrícola se fortalezca, y el encadenamiento entre todos los eslabones de producción del combustible mejore para asegurar el suministro de materia prima en cantidad y calidad para alcanzar beneficios económicos a corto y mediano plazo [45].

Por último, en el Salvador se realizan pruebas en donde se usa el metanol no como catalizador, sino como biocombustible realizando la respectiva caracterización (densidad, punto de ebullición y punto de fusión), obteniendo un alto octanaje, escasez de carbono que evita emisiones, combustión más rápida que otros combustibles, etc. Adicionalmente, muestra los procesos de fabricación del metanol (Reforming, Síntesis, Destilación, con reactor de lecho fluidizado y destilación destructiva de la madera), junto con el cálculo de cuanta madera se requiere para producir metanol mediante el último proceso mencionado (1 ton de madera para 20 L de metanol) y se concluye que el metanol debe ser combinado con gasolina para que sea una combinación

económicamente viable, pues de manera directa, como se pretendía desde el inicio es demasiado costoso [46].

### 2.6.3. COLOMBIANO

En el Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos se dice que los biocombustibles no pagarán aranceles, pero la disminución de reservas de petróleo del país y un mayor consumo de biocombustibles en los próximos años hace que la expectativa exportadora del país sea baja. Los biocombustibles en Colombia poseen legislación favorable, precios controlados y exención de impuestos, pero en el país se debe aumentar la investigación y el desarrollo de alternativas a la petroquímica utilizando alcoholes, aceites y grasas que generarán competencias internas con los biocombustibles. En contraste con lo anterior, Colombia desarrolló una política al incluir a El Salvador como país beneficiario de donaciones de plantas como una estrategia para solamente figurar como el segundo país productor de biocombustibles de América Latina, y exportador de tecnología, pero la realidad es otra, pues el potencial científico o tecnológico de Colombia en biocombustibles existe solamente en las Universidades [47].

El modelo dinámico de descripción del mercado en Colombia se basa en cinco dimensiones de sostenibilidad: política, económica, social, ambiental y tecnológica; este modelo está diseñado para evaluar la sostenibilidad y apoyar la política gubernamental de biodiésel en Colombia y el resultado muestra que en el mercado los componentes más influyentes son: la producción de biodiésel, el precio del aceite de palma, las hectáreas de palma en la fase de producción, la producción de aceite de palma y las hectáreas de palma en fase de desarrollo. En el análisis dimensional, la sostenibilidad política hace que el mercado del biodiésel se comporte como el del diésel, en la sostenibilidad económica se requiere que se reduzca el precio mediante la reducción de los costos de la materia prima, en la sostenibilidad social se debe aumentar el número de hectáreas sembradas para generar mayores ganancias a los cultivadores, en la sostenibilidad tecnológica se debe buscar mejoras en los métodos de producción mediante nuevas tecnologías. Los autores en este artículo muestran que un defecto en su análisis fue no haber colocado el precio real del biodiésel y para comprender totalmente el artículo se deben tener claras las herramientas de simulación económica [48]

En este mismo contexto, la descripción de las herramientas utilizadas para la gestión de la cadena productiva, apoyándose en modelos matemáticos de programación matemática, dinámica de sistemas, simulación y otros, para el biodiésel se deben considerar los eslabones, la estructura y sus indicadores de eficiencia. En Colombia los modelos matemáticos desarrollados para apoyar la toma de decisiones en la gestión de la cadena de suministro a nivel nacional son escasos. Los resultados muestran que no existen artículos relacionados con las cadenas de abastecimiento del combustible a partir del aceite de palma, muy pocos relacionados al modelamiento matemático de las

cadenas de abastecimiento de biocombustible e invita a que se realicen estudios en este tema [49].

Como complemento, en una investigación sobre perspectivas de biodiésel en Colombia, se encuentra que la producción de biocombustibles en donde las tecnologías, perspectivas de desarrollo y retos de esta industria, deben reformular su estrategia de fomento a proyectos rurales de biocombustibles, apoyar la investigación y fortalecer de la imagen, que, hasta el momento es negativa. Como aporte muestra el impacto ambiental que la movilidad sostenible tendrá Colombia, debido a que se verá influenciada positivamente por el uso masivo del biodiésel y el alcohol al disminuir una gran cantidad de efluentes gaseosos contaminantes [47].

Pero no todo es negativo, el país junto con otros países (India, Malasia, Paraguay, Tailandia y Vietnam) en vía de desarrollo cuentan con requerimientos de mezcla de biodiésel, lo que permitirá un incremento en el uso del biodiésel [40] y a la vez, está realizando investigaciones como por ejemplo la producción de biodiésel a partir de mezclas de aceites (linaza, girasol, oliva y palma) con microalgas utilizando la transesterificación con metanol y soda caustica hace que la investigación esté a la vanguardia del tema a nivel latinoamericano porque se obtiene un biodiésel de tercera generación en donde se tienen en cuenta las principales variables que pueden afectar el proceso (relación molar alcohol-aceite, temperatura de reacción y cantidad de catalizador) y que permite la producción más rápida del combustible [50].

Y para culminar, otras investigaciones, desarrolladas en la región de Santander (Colombia), sobre el manejo de aceite vegetal usado en el proceso productivo de una fábrica de biodiésel muestran desde el diseño de la planta, el procedimiento de identificar el proceso de elaboración de biodiésel, la determinación de equipos y maquinaria a emplear, hasta el diseño de la distribución física de la planta y/o sus áreas de producción. Como resultado, elaboran un diagrama de relaciones entre las distintas áreas que conforman el proceso donde se generaron tres alternativas de producción, la selección de la mejor opción con relación a factores previamente establecidos, y finalmente se logra diseñar el proceso productivo para la elaboración de biodiésel. Al final, presentan la factibilidad económica del proyecto que, de hacerse realidad, mejorará la situación actual de la región en términos socio-económicos y ambientales. El trabajo a futuro será la fabricación, puesta en marcha y las labores pertinentes para la comercialización del producto. Faltaría mostrar cómo será el procedimiento de venta y las normas concernientes a la producción aprobadas por el gobierno colombiano [51].

## 2.7. MARCO CONCEPTUAL

Desde el primer uso del aceite de maní en 1900 hasta las estrictas normas actuales de ASTM para ésteres metílicos de aceite vegetal, es decir, biodiésel, el uso de aceites vegetales y grasas animales como fuente para las aplicaciones de combustible diésel ha

recorrido un largo camino. La industria está actualmente disfrutando de un crecimiento exponencial, y las políticas públicas probablemente alentarán un mayor crecimiento a lo largo del tiempo. Las fuerzas motrices para el uso de biodiésel son muchas y pueden llegar a ser incluso más importantes a medida que pasa el tiempo. Las tecnologías futuras, como los motores diésel ultralimpios o las celdas de combustible, en realidad representan más oportunidades para el biodiésel, más que amenazas. Posiblemente, ya no se tratará de saber si el biodiésel tendrá éxito; sino de establecer qué tan grande será el mercado y qué tan pronto se llegará a estos niveles.

Se demuestra que hay varias aplicaciones del biodiésel entre ellas la generación eléctrica, la calefacción de hogares, las calderas industriales y pilas de combustible, que también pueden ver un crecimiento significativo, dependiendo de las políticas y otras presiones sociales. El biodiésel se puede usar como una mezcla o como un combustible limpio para la generación de electricidad en grupos electrógenos diésel (tanto pequeños como grandes), que podrían usarse potencialmente para cumplir con los mandatos de energía renovable. El biodiésel también se puede usar en aplicaciones de turbinas de gas para crear electricidad, en sistemas de calefacción de combustible doméstico o como combustible para calderas industriales en cualquier lugar donde se use aceite combustible # 2 o # 6. En estas aplicaciones de llama abierta, el biodiésel parece reducir el NOx (debido a su contenido de oxígeno), y algunas empresas o municipios pueden elegir el uso de biodiésel en estas aplicaciones por las mismas razones sociales que para las mezclas bajas en el sector del transporte (petróleo, salud, medio ambiente, empleos) mientras que también reduce los NOx. [52]

Por otro lado, la inminente disponibilidad comercial de la futura generación de biodiésel, es económicamente cada vez más factible, porque este combustible debe permanecer como un sustituto del diésel fósil que potencialmente puede satisfacer a mediano plazo las necesidades de energía para formar parte de la solución total a la energía en todo el mundo y los problemas ambientales [49]. El biodiésel es más caro de producir que el diésel de petróleo, lo que parece ser el factor principal en la no generalización de su uso. La producción actual mundial de aceite vegetal y grasa animal no es suficiente para reemplazar el uso de combustibles líquidos fósiles [45].

En la investigación realizada, se hace referencia al uso de biodiésel en una caldera pirotubular en un edificio con biodiésel B100 y aceite de calefacción durante 24 días en el año de 2006 y se miden las emisiones de gases por la chimenea de la caldera para ambos combustibles [53], las mediciones de la emisión de CO en ambos casos se reducen con la particularidad que no debe haber exceso de aire para la combustión del aceite de calefacción. Adicionalmente, para las emisiones de NOx muestran un ligero aumento en el caso del biodiésel. Además se comparan estos resultados experimentales obtenidos con el estado del arte llegando a la conclusión que estas emisiones dependen de la configuración del quemador y la cámara de combustión de la caldera y dentro de su investigación observan que otras pruebas similares realizadas, muestran que el biodiésel produce un 10-20% menos de NOx en comparación con el combustible para

calefacción, por lo tanto, las pruebas que realizaron resultan muy similares a lo que se trabajó en el artículo. Es importante en este artículo la comparación de las medidas de emisiones obtenidas comparadas con las normas ambientales establecidas por el gobierno canadiense, en donde se muestra que estos combustibles son mejores que el diésel convencional.

De la misma manera otros estudios verifican el potencial del biodiésel a partir de materias primas como la soya y el girasol comparado con el diésel y diferentes mezclas desde el B5 hasta el B80 y también compara las emisiones de gases de los combustibles y sus mezclas [54]. Antes de iniciar con las pruebas se caracterizan los combustibles y los resultados de las pruebas muestran que la mezcla B80 es la de mejores emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, pero es la de menor eficiencia en la combustión mientras que la mezcla B10 no redujo emisiones de CO, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Utilizan el número de dámper del ventilador dentro de los experimentos y obtienen que la temperatura de salida de gases se hace menor a medida que el número de dámper es mayor por lo que se concluye que la temperatura de las emisiones se reduce debido al aumento del flujo de aire dentro de la caldera. Con la metodología experimental utilizada se miden todas las variables propuestas y no deja lugar a duda de los resultados obtenidos.

Y culminando la demostración en cuanto a que las pruebas que se quieren realizar y que son pertinentes, se realiza un estado del arte del biodiésel con butanol como catalizador comparado con el del biodiésel con etanol estableciendo similitudes en características físico-químicas, fabricación y usos [55]. Dentro de esta misma investigación se encuentra que el retardo de la combustión del biodiésel con etanol es menor que el del diésel debido a que los tamaños de gota son más pequeños. En cuanto a la parte experimental revela una prueba en donde se usaron 30 buses que sumaron 434,500 km de utilización de combustible con butanol y también se realizaron pruebas en tractores Caterpillar y John Deere, mostrando resultados satisfactorios cuando las mezclas estaban por encima del 10%. En otra prueba realizada utilizaron mezclas de 2%, 4% y 6% de butanol mostrando baja incidencia en los cilindros de los motores, la transferencia de calor fue similar a la del etanol, pero las emisiones de hollín bajaron. Finalmente se realizaron pruebas experimentales en una caldera con las mezclas de diésel, butanol y biodiésel en una caldera de tubos con llama inversa de 50 KW., dejando pasar 20 minutos de calentamiento mientras la caldera se estabilizaba. Las mezclas entre butanol - diésel, y entre butanol - diésel - biodiésel, en diferentes proporciones muestran aspectos positivos como: La mezcla estable entre butanol y biodiésel está entre 40% y 60%, la temperatura de las emisiones se reduce aproximadamente en 13°C, con la mezcla de los tres combustibles y la eficiencia alcanza el 90% y los aspectos negativos resultantes fueron que mezclas menores al 30% de butanol con diésel son inestables con el tiempo y no permiten una buena combustión.

## CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO

En este apartado se define la clase de investigación desarrollada en este trabajo, la descripción del procedimiento realizado, la metodología utilizada en la obtención de resultados, su recopilación, clasificación y ordenamiento con el propósito de conseguir la solución del problema expuesto.

### 3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

En primer lugar, esta investigación puede clasificarse como de tipo **exploratoria** debido a que puede complementar los estudios realizados sobre el tema en un contexto particular, pues realiza una indagación del tema a nivel nacional e internacional, e identifica conceptos y variables a utilizar. En segundo lugar, la investigación es de tipo **descriptiva** porque muestra cómo se realiza un proceso de producción, especifica las propiedades de un producto y mide sus características, y al mismo tiempo realiza la recolección de información acerca de estas, como también, la posibilidad de enunciar nuevas investigaciones a futuro. En tercer lugar, el trabajo se puede catalogar como de clase **correlacional**, debido a que asocia variables para establecer relaciones entre ellas y medir el grado de asociación entre las mismas. Y, por último, también se puede clasificar de género **explicativa** porque establece la razón entre la asociación las variables identificadas y medidas con el fin de conocer el cual es el efecto producido. [56]

Con el fin de dar respuesta a las preguntas planteadas por la investigación y cumplir con los objetivos establecidos, se lleva a la práctica un diseño **cuantitativo transversal de tipo cuasiexperimental en grados y cuasiexperimental de tipo factorial**. [57]

### 3.2. TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS

En concordancia con los objetivos definidos en el presente estudio, se emplean diferentes técnicas que reflejan confiabilidad, validez y objetividad en la recolección de datos y cuyo propósito es la de alcanzar los fines propuestos. Las técnicas utilizadas para recopilar la información fueron las siguientes:

1. Técnicas documentales: Para iniciar se realiza una investigación documental que consiste en la revisión y búsqueda de bibliografía (libros, revistas, periódicos, videos entre otros) con respecto al tema de estudio, para de esta manera delimitar el tema, plantear el problema, las preguntas ejes de la investigación. [56]

2. Búsqueda de datos secundarios: Son estudios relacionados o similares que contienen la suficiente e importante información (recolectadas por otros investigadores) que implica la búsqueda de artículos científicos, registros públicos y archivos en búsqueda del comportamiento de las variables que nos interesan, incluyendo estadísticas y metaanálisis, para con ello, definir procedimientos y tener en cuenta aspectos relevantes de la investigación con el fin de alcanzar los objetivos trazados. [56]
3. Pruebas estandarizadas: Para continuar con el estudio, se aplican ensayos patrón desarrollados por instituciones reconocidas como lo son la ASTM y el ICONTEC, test que han sido probados y comparados con un patrón internacional para la obtención de características de un producto, siguiendo un procedimiento determinado para obtener respuestas que validen el constructo. “No es conveniente llevar a cabo tal validación, a menos que exista un marco teórico que soporte la variable en relación con otras variables. Desde luego, no es necesaria una teoría muy desarrollada, pero si investigaciones que hayan demostrado que los conceptos se relacionan. Cuanto más elaborada y comprobada se encuentre la teoría que apoya la hipótesis, la validación del constructo arrojará mayor luz sobre la validez general de un instrumento de medición” [56]. En este caso se utilizan pruebas estandarizadas para la caracterización físico-química del biodiésel, en especial para hallar propiedades como la densidad, el número ácido, la viscosidad cinemática y el punto de flama.
4. Instrumentos mecánicos o electrónicos: Son sistemas de medición que utilizan aparatos especializados en la obtención de resultados acordes con la finalidad del estudio [56]. En esta investigación, por ejemplo, se utiliza, primero, un analizador de emisiones de gases que indica los porcentajes de CO<sub>2</sub>, CO, NO, NOX, % mezcla de aire en la combustión, y temperatura de los gases emitidos al ambiente; y un dinamómetro para comprobar la fuerza transmitida por la turbina de la planta térmica piloto.
5. Instrumentos específicos propios: Son formatos en donde se condensan los datos recolectados bien sea por las pruebas estandarizadas o por los instrumentos de medición electrónicos para luego transferirlos a matrices de datos en donde se ordenan los datos recolectados para luego analizarlos.
6. Técnicas de cálculos y análisis estadísticos: Estas técnicas permiten dentro de este estudio conocer la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos con respecto a la teoría y con herramientas informáticas como: EXCEL y MATLAB, mostrar el comportamiento de las variables y establecer relaciones entre las mismas con el fin de dar cumplimiento a los interrogantes de la investigación.

### 3.3. FASES METODOLOGICAS

A partir del diseño de la investigación, se plantea un procedimiento para obtener en primer lugar, un producto con calidad y, en segundo lugar, la evaluación del producto en cuanto a rendimiento y emisiones ambientales. Este procedimiento se desarrolla en varias etapas que se muestran en la figura 5.

#### PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE REFINADO DE PALMA MEDIANTE TRANSESTERIFICACIÓN CON ETANOL Y ESTUDIO DEL EFECTO EN UNA PLANTA TÉRMICA PILOTO: CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MEDIO AMBIENTAL

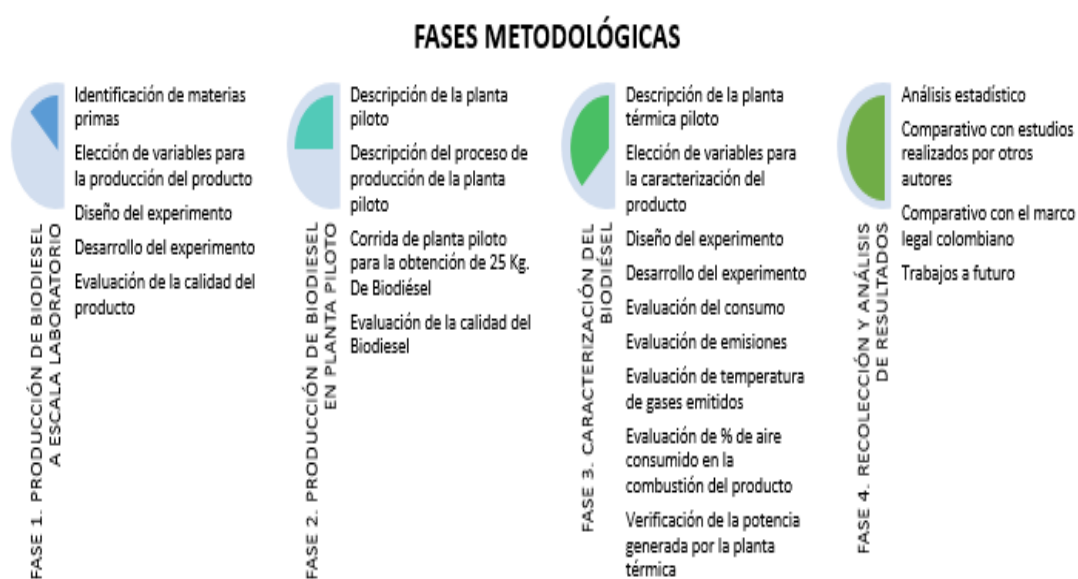


Figura 5. Diseño de la investigación. [autores]

#### 3.3.1. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA LABORATORIO

En esta fase se traza la metodología que se utilizará para la elaboración de biodiésel a partir de aceite refinado de palma en el laboratorio de biocombustibles de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – Uniagraria, para establecer cuáles deben ser las otras materias primas del proceso de producción y a continuación realizar las pruebas del laboratorio en donde se escogerán las variables y los rangos de variación de los componentes que inciden en la reacción de transesterificación, según resultados de investigación realizadas por la misma universidad y otros autores, para definir el diseño del experimento y encontrar las cantidades óptimas de los factores considerados en el paso anterior. Finalmente, se especifica las condiciones del desarrollo del experimento en el laboratorio para la elaboración del biodiésel, y se realizan pruebas de calidad del



producto elaborado y con los datos obtenidos establecer la mejor mezcla para producir el biodiésel a la escala de la planta piloto.

### 3.3.1.1. IDENTIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

De acuerdo a la justificación realizada en el capítulo anterior, para este proyecto de investigación se definen como materias primas de biodiésel los siguientes productos: Aceite refinado de palma (ARP); y como acelerantes de la reacción, en primer lugar, un catalizador básico como lo es el hidróxido de potasio (KOH), y, en segundo lugar, Etanol anhidro como el alcohol presente en la reacción de transesterificación.

#### ACEITE REFINADO DE PALMA

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se usó aceite refinado, blanqueado y desodorizado de palma suministrado por la empresa Supra aceites S.A.S., y para la caracterización del mismo se utilizó la normatividad vigente.

Tabla 8. Caracterización del aceite refinado de palma

CARACTERÍSTICA	MÉTODO
Índice de yodo	NTC 283
Índice de saponificación	NTC 335
Índice de refracción	NTC 289
Índice de acidez	NTC 218
Determinación de la densidad	NTC 336
Contenido de jabones	NTC 1147

Fuente: [58]

#### HIDROXIDO DE POTASIO (KOH)

Como catalizador básico se utilizó hidróxido de potasio en escamas marca Riedel-de Haen, Lote 50740.

#### ETANOL (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH)

Y como alcohol, se utilizó etanol anhidro (Alcohol etílico) grado reactivo.

### 3.3.2. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO EN LABORATORIO

De acuerdo a la investigación desarrollada, para la obtención del biodiésel a escala laboratorio se utilizó como materia prima aceite de palma refinado, cuyos principales componentes son los triglicéridos, los cuales tienen mayor proporción que los ácidos grasos, estos componentes hacen reacción con un alcohol de bajo peso molecular, en este caso el etanol, produciendo un intercambio de grupos funcionales llamado reacción de transesterificación, los grupos alcoholes comienzan a atacar el triglicérido, formando inicialmente diglicéridos, cuando el ataque continúa forman los monoglicéridos, y finalmente se forma el glicerol o glicerina y tres moléculas de éster metílico, las moléculas de éster metílico se denominan biodiésel, el proceso se describe en la figura dos.

En la siguiente tabla se muestran las materias primas, los reactivos y las cantidades utilizadas en la obtención del biodiésel a nivel laboratorio.

**Tabla 9. Cantidad de materia prima para la obtención de biodiésel**

<b>Reactivos</b>	<b>Cantidad</b>
Aceite vegetal	250 gr
Etanol anhidro	200 ml
Hidróxido de potasio	3.754 gr

Fuente: [autores]

Los equipos utilizados para realizar el proceso de transesterificación, se relacionan en la tabla 10.

**Tabla 10. Equipos utilizados para la obtención del biodiésel en el laboratorio**

<b>Equipos</b>	<b>Cantidad</b>
Placa de calentamiento	1
Condensador de serpentín	1
Reactor de cuatro bocas en vidrio de capacidad 1000 ml	1
Beaker de 1000 ml	1
Ellemyer de 250 ml	1
Pesa electrónica lexux	1
Agitador magnético (Boeco Germany)	1
Papel aluminio	1
Condensador de reflujo Lauda	1
Reactor de vidrio de 1000ml	1
Termómetro de vidrio	1
Embudo de decantación	1

**Fuente: [autores]**

## **METODOLOGIA:** Proceso general de producción

Proporción de los reactivos:

- Aceite vegetal: 250 g.
- Etanol: 200% de exceso (150 ml), para hacer una reacción completa, evitando que el biodiésel contenga monoglicéridos y diglicéridos, es decir un biodiésel de baja calidad, sin conversión completa.
- Catalizador KOH: 1,5% en peso respecto del aceite vegetal (3,754 g)
- Disolución del catalizador

### **Preparación de las materias primas**

Con el fin de retirar la humedad, el aceite de palma se sometió a un calentamiento a 110°C por espacio de 5 minutos. Para esto, el aceite se deposita un Beaker que es calentado por medio de una placa calefactora hasta alcanzar la temperatura adecuada y dejado allí por un tiempo no mayor a 15 minutos.



**Figura 6.** Calentamiento del aceite de palma a 110°C

Una vez calentado el aceite de palma, se mide en un Erlenmeyer 250ml, se pesa el catalizador (KOH) y se adicionan rápidamente al Erlenmeyer que contiene el etanol, se introduce un agitador magnético, se tapa el Erlenmeyer con papel aluminio para minimizar la entrada de aire y se agita suavemente hasta obtener la disolución total de las lentejas del KOH.



**Figura 7.** Medición del etanol y disolución del catalizador en el etanol

- Reacción

Se adiciono el catalizador disuelto en el etanol a un reactor de vidrio de cuatro bocas de capacidad 1000 ml, junto con el aceite vegetal. La mezcla reactante se llevó a ebullición, no olvidando conectar las mangueras de suministro de agua al condensador de reflujo total y suministrar el agua requerida. Posteriormente se llevó a cabo la reacción por espacio de 90 minutos.



**Figura 8. Sistema de reacción para la obtención de biodiésel en laboratorio**

- Decantación

Una vez transcurridos 90 minutos de reacción, se destiló o removió el etanol de exceso de la mezcla reactante hasta que esta se torna turbia. Removido el etanol se trasladó la mezcla a un embudo de decantación y se dejó reposar allí por 24 horas, hasta que se produjo dos capas, una de glicerina y una de biodiésel como se puede observar en la siguiente figura.



**Figura 9. Separación del biodiésel de la glicerina**

Finalmente se retiró la glicerina la cual es más densa y se dejó el biodiésel para su posterior análisis. En la figura 10, se muestra el proceso realizado para la obtención del biodiésel a escala laboratorio.

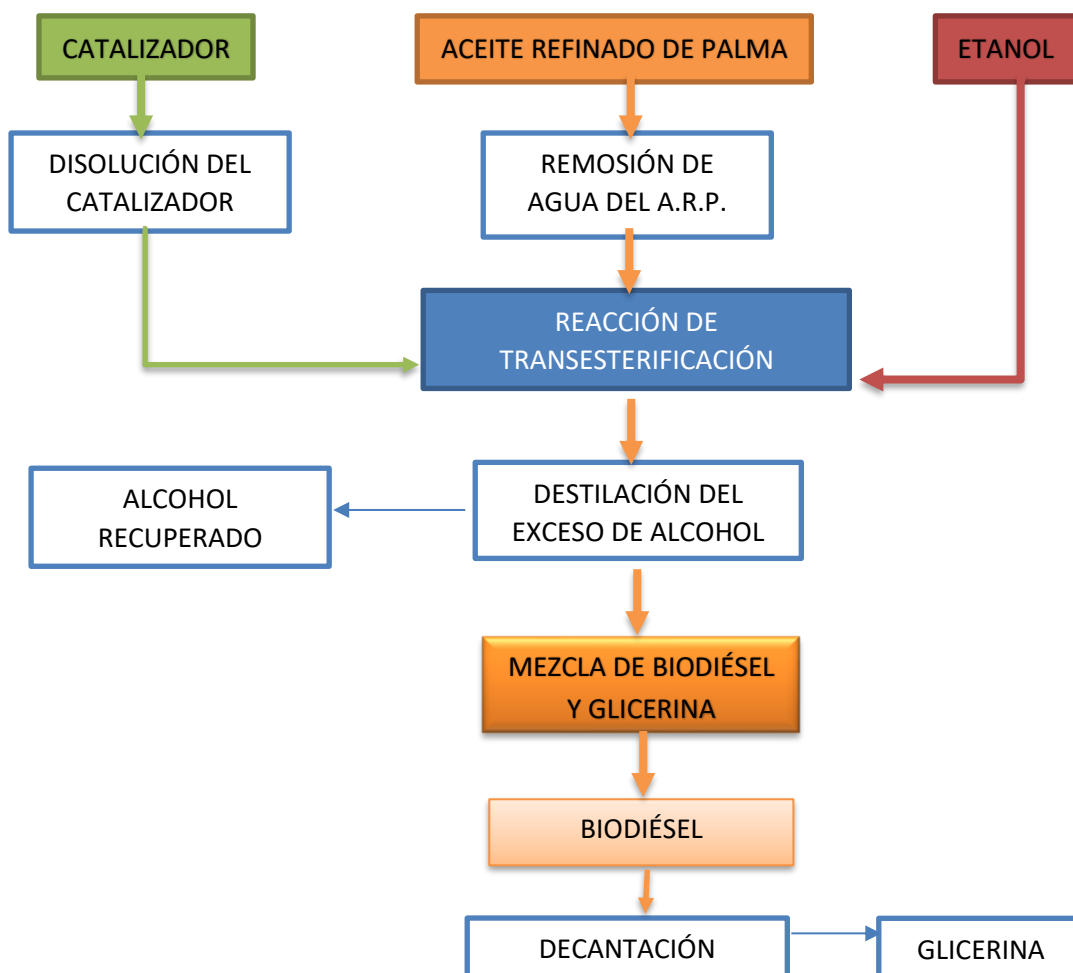


Figura 10. Producción de biodiésel a escala laboratorio [autores]

### 3.3.3. CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL

En la tabla 6 se mostraron las propiedades de calidad de biodiésel según la norma FAAE (Fatty Acid Alkil Ester) y cuyo equivalente en Colombia es la norma técnica nacional NTC 5444 en donde se determinan los parámetros que debe cumplir el biodiésel (B100) en Colombia. Para el presente proyecto, se evaluaron características tales como viscosidad, densidad, índice de acidez y punto de flama. En la tabla 6 se muestra la caracterización del Biodiésel según la norma NTC 5444.

### 3.3.3.1. Densidad

La densidad del Ése determinó por medio de un picnómetro donde se calcula el volumen de éste mediante los datos obtenidos con agua destilada sabiendo la densidad del agua a temperatura ambiente. La densidad es igual a la masa del biodiésel dividido por su volumen que será igual al volumen del picnómetro. Una vez calculado el volumen del picnómetro, y sabiendo la masa de biodiésel ya se está en disposición de calcular la densidad del biodiésel. EN 14214 establece el intervalo de la densidad permitida entre 860 – 900 kg/m<sup>3</sup>. (Ver anexo 4)

Tabla 11. Caracterización del biodiésel según NTC 5444

PROPIEDAD	UNIDAD	REQUISITO	MÉTODOS DE ENSAYO
Densidad a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	860 - 900	ASTM D4052
Viscosidad (cinemática a 40°C)	mm <sup>2</sup> /s	1,9 – 6,0	ASTM D445 ISO 3104
Número Ácido	mg de KOH/g	0,5 máximo	ASTM D664 ISO 14104
Punto de flama	°C	120 mínimo	ASTM D93 ISO 2719

Fuente: [58]

### 3.3.3.2. Viscosidad (cinemática a 40°C)

El método que se usó para medir la viscosidad fue mediante un viscosímetro de Oswald donde se determinó la viscosidad del biodiésel midiendo el tiempo de flujo (t) entre dos puntos calibrados de un volumen dado (V) del líquido, en un tubo capilar bajo la influencia de la gravedad. (Ver anexo 2)

### 3.3.3.3. Número Ácido

Es la cantidad de base expresada en mg de hidróxido de potasio por g de muestra necesaria para titular una muestra hasta un punto final especificado. Para este método la muestra se disolvió en una mezcla de tolueno y 2-propanol conteniendo una pequeña cantidad de agua y titulando potenciométricamente con hidróxido de potasio 0,1M usando un equipo titulador potenciométrico marca Hanna. (Ver anexo 1)

### 3.3.3.4. Punto de flama

Para la determinación del punto de inflamación del combustible se tuvo en cuenta la metodología propuesta por la norma ASTM D93. El punto de inflamación se determinó calentando una muestra del biodiésel en un recipiente con agitación constante y pasando una llama sobre la superficie del líquido. Si la temperatura está en o por encima del punto de inflamación, el vapor se encenderá observando un destello fácilmente detectable. (Ver anexo 3)

### 3.3.4. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN PLANTA PILOTO

Para la obtención de biodiésel a nivel piloto se utilizaron las condiciones que a nivel laboratorio dieron las mejores características y el más alto rendimiento de biodiésel.

A la planta piloto se cargaron 25 kg de ARP, la cual se calentó hasta una temperatura de 65°C para fundir el ARP, en forma paralela se disolvió el hidróxido de potasio usado como catalizador en concentración en peso del aceite vegetal en etanol anhidro y la relación molar que mejor rendimiento dio en la etapa experimental.

La reacción de transesterificación se llevó a cabo por espacio de 1.5 h al cabo del cual se retiró el etanol de exceso por destilación y la mezcla de productos (biodiésel + glicerina) se llevó al equipo de separación y lavado donde se dejó decantar por espacio de 24 h.

Al siguiente día de la reacción se separó la glicerina del biodiésel, a continuación, el biocombustible se lavó con una solución ácida (ácido cítrico al 0.1%) nombrada anteriormente.

Posteriormente, el agua de lavado se retiró del biodiésel y se repitió el proceso hasta que el agua residual alcanzo un pH neutro. El biodiésel lavado se evaporo a una temperatura de 110°C por espacio de 10 min, para remover trazas de agua del proceso de lavado. Finalmente, este biodiésel se filtró por medio de un filtro bolsa de tamaño de poro de 0.5  $\mu\text{m}$ , para su posterior caracterización y uso.

### 3.3.4.1. BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO

El diseño de la reacción de transesterificación en la planta térmica piloto de la universidad Uniagraria se realizó con base al balance estequiométrico y balance de masa que se muestra en la figura

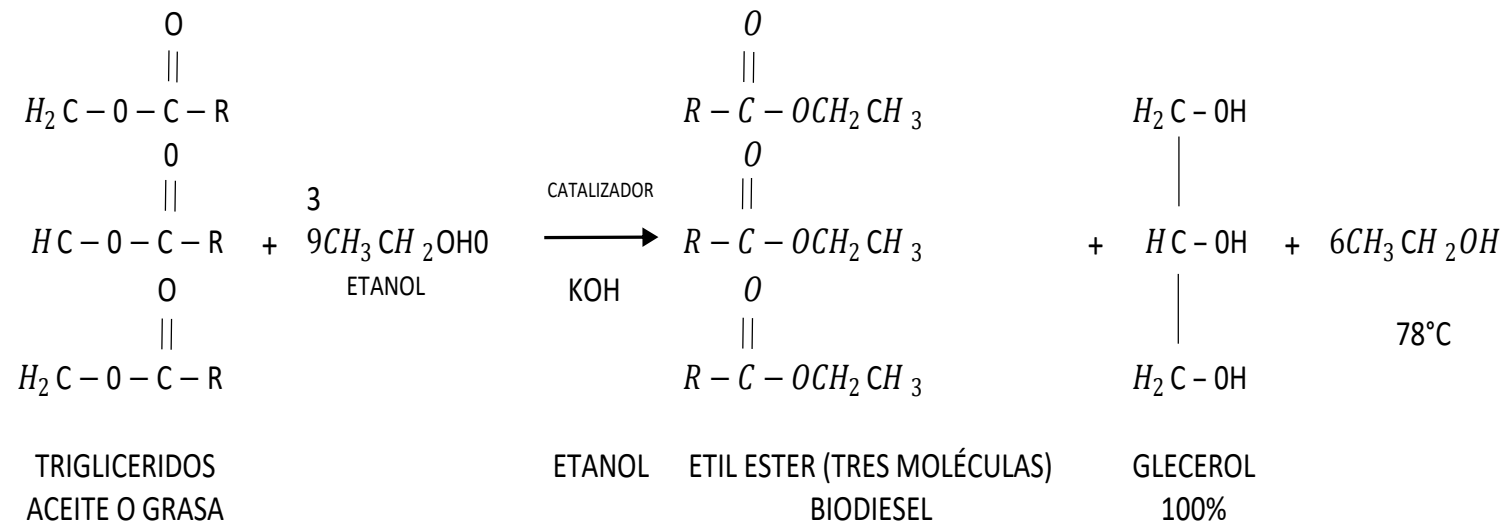


Figura 11. Balanceo estequiométrico del biodiésel para planta piloto de biodiésel



En la figura 8 se puede observar el diagrama de flujo de la operación en planta piloto.

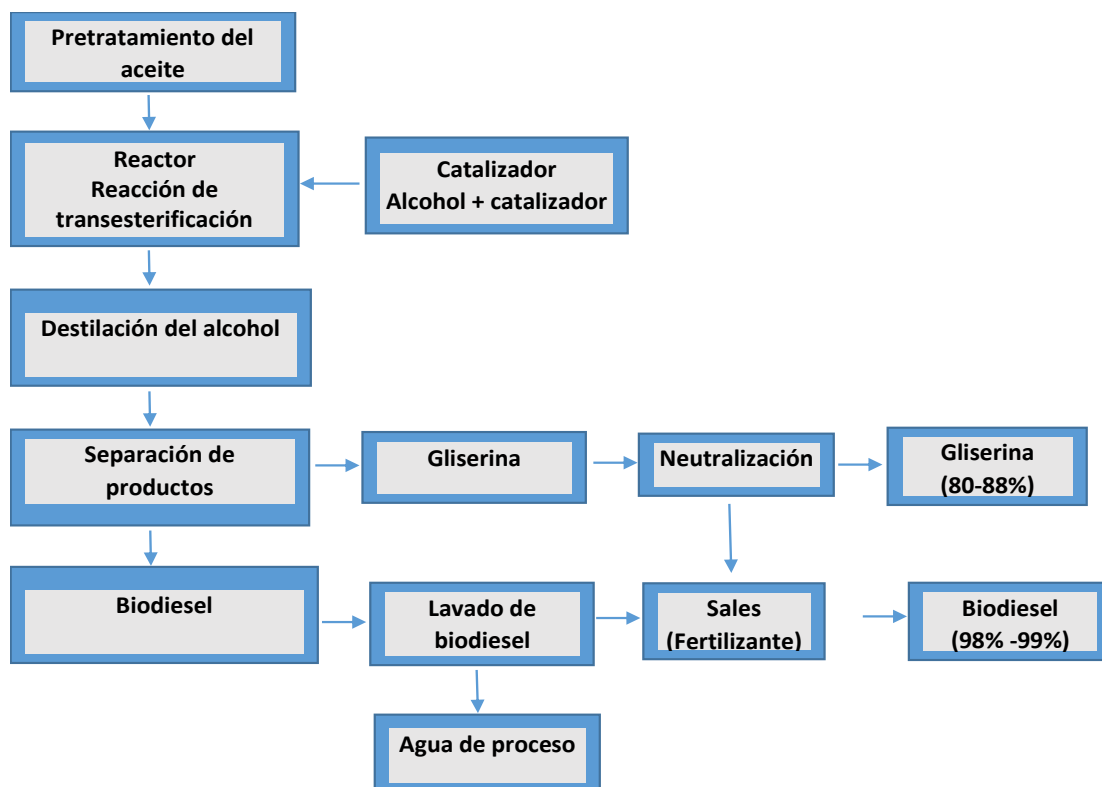


Figura 12. Operación en planta piloto [autores]

### 3.3.5. CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL EN PLANTA TÉRMICA PILOTO

#### 3.3.5.1. Consumo

Después de obtenidos los 25 Kg de biodiésel se procede a realizar las pruebas de consumo del combustible en la caldera de la planta térmica piloto.

Para esto se realizó el procedimiento que se muestra en la figura 13



Figura 13. Procedimiento para caracterización de consumo de biodiésel. [autores]

### 3.3.5.2. Ambiental

Durante el tiempo transcurrido de cada prueba se efectúa el análisis de emisiones de gases por la chimenea caldera con el equipo analizador, realizando cinco (5) lecturas por cada mezcla de biocombustible.

### 3.3.5.3. Caracterización Física

Se comprueba que el biodiésel en la turbina de la planta térmica produzca la misma potencia. Para ello se mide la potencia eléctrica producida por la turbina y que se muestra en el tablero del que dispone la planta térmica para ello.

En donde:

La potencia eléctrica desarrollada en un cierto instante por un dispositivo viene dada por la expresión

$$P(t) = I(t) * V(t)$$

Ecuación 1. Potencia eléctrica

Donde:

$P(t)$  es la potencia instantánea, medida en vatios (julios/segundo).

$I(t)$  es la corriente que circula por él, medida en amperios.

$V(t)$  es la diferencia de potencial (caída de voltaje) a través del componente, medida en voltios.

### 3.4. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de investigación se realizará en dos lugares:

1. El laboratorio de biocombustibles de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia con dirección Calle 170 # 54A -10 en Bogotá (Colombia), localizado en las coordenadas a  $4^{\circ}45'70''N$  y a  $74^{\circ}03'12'' O$ , una elevación 2650 m sobre el nivel del mar, una humedad relativa del 94% y una temperatura anual promedio de  $14^{\circ}C$ .



Figura 14. Ubicación sede Bogotá UNIAGRARIA [59]

2. El laboratorio de Mecánica, sede J, de la Universidad ECCI con dirección Cra. 19 # 49-20 en Bogotá (Colombia), localizado en las coordenadas a  $4^{\circ}38'17.0''N$   $74^{\circ}04'17.2''W$ , una elevación 2650 m sobre el nivel del mar, una humedad relativa del 94% y una temperatura anual promedio de  $14^{\circ}C$ .

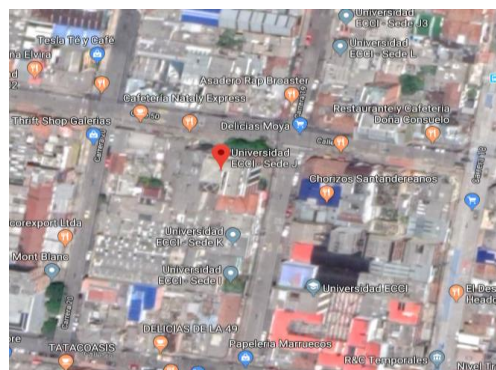


Figura 15. Ubicación sede J Bogotá Universidad ECCI. [59]

### 3.4.1 MAQUINARIA Y EQUIPOS

#### 3.4.1.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

Para el desarrollo del proyecto de investigación se utilizaron equipos para realizar pruebas de calidad al biodiésel producido que se listan a continuación:

- Equipo para punto de flama marca KOEHLER
- Equipo potenciométrico de valor ácido marca TITROLINE EASY
- Viscosímetro marca OSWALD
- Refractómetro marca ALFAQUIMICA.
- Baño termostataado marca LAUDA
- Balanza analítica marca PRECISA
- Plancha de calentamiento con agitación magnética marca BOECO
- Bomba de vacío marca UNIWELD de 3HP.

#### 3.4.1.2 PLANTA PILOTO DE BIODIÉSEL

Después de elaborado el biodiésel a escala laboratorio, para la producción del combustible en una mayor escala, se utilizó la planta piloto de la UNIVERSIDAD AGRARIA DE COLOMBIA – UNIAGRARIA.

La planta piloto hecha en acero inoxidable 304 cuenta con una capacidad de 25 kg de aceite por lote y cuyo esquema de producción, se muestra en la figura 16.

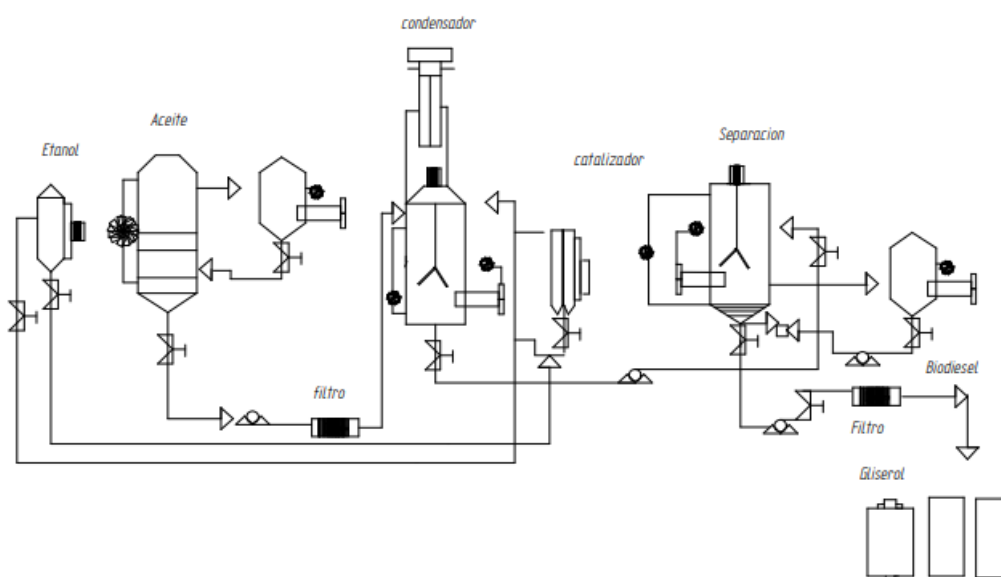


Figura 16. Diagrama descriptivo de la planta piloto para producción de biodiésel [Autores]

Hacen parte de la planta piloto las partes que se describen a continuación:

### **PLANTA DE BIOCOMBUSTIBLE DE LA UNIVERSIDAD UNIAGRARIA**

Esta planta de biocombustibles, ubicada en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia con dirección Calle 170 # 54A -10 en Bogotá (Colombia), es adecuada para este proyecto, básicamente por la cantidad de biocombustible que produce en una sola corrida, aproximadamente 25 kilogramos de, lo cual es una cantidad suficiente para realizar las pruebas de estudio en la planta piloto de la Universidad ECCI; a continuación, se hace una breve descripción de la planta de biodiésel de la Uniagraria.



**Figura 17. Planta piloto de biodiésel UNIAGRARIA [autores]**

#### **Tanque de agua caliente**

Tanque en acero inox. 304 de capacidad 40 litros, con calefacción por resistencia eléctrica (dos resistencias de 13 KW cada una)



**Figura 18. Tanque de agua caliente planta piloto de biodiésel [autores]**

## **Reactor**

Equipo en acero inoxidable con capacidad de 50 litros y volumen de operación 25 litros. Con termocupla tipo J, motor con variador de velocidad para el control del mezclado. Cuenta con chaqueta externa por donde circula el agua de enfriamiento, así como dos resistencias de 13 KW cada para el requerimiento térmico.



**Figura 19. Reactor planta piloto biodiésel UNIAGRARIA [autores]**

### **Condensador de tubo y coraza**

Intercambiador de calor con 23 tubos en acero inoxidable, por donde circula el agua de enfriamiento y carcaza por donde circula el alcohol vaporizado para su condensación.



**Figura 20. Condensador de tubo y coraza planta piloto biodiésel UNIAGRARIA**

### **Equipo de separación y lavado**

El equipo tiene una capacidad de 50 litros y volumen de operación de 25 litros. Cuenta con control de temperatura compuesto por una termocupla tipo J y dos resistencias de 13 KW cada una la agitación se lleva a cabo por medio de un motor de 1 HP de potencia.



**Figura 21. Separador planta biodiésel UNIAGRARIA. [autores]**

## Tablero de control

Tablero donde se controla la temperatura, velocidad de agitación y sistema de bombeo entre equipos.



Figura 22. Tablero de control planta biodiésel – UNIAGRARIA [autores]



## **PLANTA TERMICA PILOTO DE LA UNIVERSIDAD ECCI**

La planta térmica de la universidad ECCI, es una planta termoeléctrica con propósitos educativos y de investigación, esta planta cuenta con sistemas de seguridad y monitorización de variables, las cuales permiten la lectura de las mismas durante las prácticas de los estudiantes.



**Figura 23. Planta térmica piloto Universidad ECCI. [autores]**

La planta cuenta con un conjunto de equipos térmicos, mecánicos, eléctricos y electrónicos, los cuales proporcionan las herramientas necesarias, para que los estudiantes realicen sus investigaciones y prácticas.

Los equipos con los cuales cuenta la planta son los siguientes:

### **Caldera de vapor**

Es una caldera marca Teknik, de 15 BHP, presión de diseño de 150 Psi, presión de operación 125Psi, combustible ACPM, de tipo piro tubular vertical de un paso, eficiencia del 81-82%, cuenta con una cámara de combustión refrigerada por agua, quemador On-off de tipo forzado, programadores de combustión Honeywell, Beckett, A.B.C., Mc Donnell & Miller. Ensamblada en Bogotá bajo normas ICONTEC y ASME, con garantías y certificados de calidad, equipo marca Teknik, con acabado del aislamiento exterior en acero inoxidable.



**Figura 24.** Caldera de la planta térmica de la universidad ECCI [autores]

### **Tanque de alimentación de agua y retorno de condensados**

Tanque marca Tecnik con capacidad de 30 galones tipo cilíndrico horizontal, fabricado con aceros al carbono; cuenta con un conjunto de motobomba IHM con presión de 200 Psi, con mirilla de inspección, medidor de temperatura, filtro, válvula cheque y accesorios de instalación.



**Figura 25.** Tanque de alimentación de agua y retorno de condensados de la caldera [autores].

## Tanque de combustible

Es un tanque con una capacidad de 90 galones, el cual alimenta al tanque de predosificado, y posteriormente al quemador de la caldera, este tanque de ACPM está fabricado con láminas de acero HM calibre 1/8, con una capacidad de 340 litros y un diámetro de 300 mm.



Figura 26. Tanque de combustible caldera de la planta térmica piloto. [autores]

## Tablero principal

Con elementos de mando y control, sistemas de seguridad que garantizan el funcionamiento confiable y seguro de todas las aplicaciones, se incluye un equipo HMI Unitronics de toque para visualizar las diferentes señales de salida del equipo, multímetro que monitoria señales de salida del equipo, multímetro que monitorea señales de salida del generador de energía, medidor de revoluciones, pare de emergencia y pulsadores sobre un diagrama de funcionamiento para visualizar las diferentes variables.



Figura 27. Tablero de control principal planta térmica piloto [autores]

### **Suavizador de agua de intercambio iónico**

Cuenta con un tanque de salmuera de retro lavado tipo industrial marca Disin, modelo DI-14M, de una columna de diámetro 14 plg, altura de 60plg, con una presión de operación de 50psi, un peso en vacío de 75 kgy una capacidad de preparación de 120 litros.



**Figura 28. Suavizador de agua planta térmica piloto [autores].**

### **Torre de enfriamiento**

De tipo industrial con flujo de aceite inducido, marca Axima Sulzer Escher Wyss, largo de 0,81 m; altura 2,32m; peso en vacío 115 kg; caudal 41,4 gal/min, temperatura de entrada 70°C, temperatura de salida 40°C



**Figura 29. Torre de enfriamiento de agua de la planta térmica piloto [autores]**

### **Tanques de agua fría y caliente**

Fabricados en acero HR calibre 1/8, con capacidad de 150 litros, cada uno de ellos con mirilla en vidrio calibrada para verificar volumen de agua, el tanque de agua fría (inferior), cuenta con un sensor de nivel que apaga la bomba cuando el nivel de agua baja del mínimo recomendado.



**Figura 30. Tanques de agua fría y caliente [autores].**

### **Condensador de vapor:**

El condensador de vapor es tipo carcasa-tubos. El vapor de salida de la turbina circula por la carcasa, mientras que el agua de enfriamiento circula por el interior de los tubos, los tubos son de longitud de 1000 mm, diámetro externo 13,7mm, diámetro interno 9,19 mm.



**Figura 31. Condensador de vapor de la planta térmica piloto [autores].**

## Distribuidor de vapor

Marca Ingenium, fabricado en acero al carbón, con una entrada de 1 pulgada y tres salidas de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, más una salida para condensadores de  $\frac{1}{2}$  pulgada, con sus equipos de trapeo, válvulas esféricas, globo, filtro, trampa termodinámica y cheque. Aislamiento mediante lana mineral, y acabado del aislamiento en acero inoxidable. Dentro del sistema de trapeo se cuenta con una trampa termodinámica de  $\frac{1}{2}$  pulgada, marca Spirax sarco.



Figura 32. Distribuidor de vapor de la planta térmica piloto. [autores]

## Caudalímetro de Vapor

Cuenta con dos caudalímetros tipo orificio con un diámetro interno de 21 mm y las placas orificio se muestran en la tabla 12 así:

Tabla 12. Características de caudalímetro de vapor planta térmica piloto Universidad ECCI.

Medidor	Diámetro de orificio	C (Coef. De flujo)
Vapor Turbina	0,0105 m	0,623
Vapor Proceso	0,0105 m	0,623

Fuente: [autores]



Figura 33. Caudalímetro de la planta térmica piloto. [autores]

### **Válvula de control PID (proporcional integral derivativo)**

Gobernada por el HMI Unitronic, permite modular las condiciones de funcionamiento y permitir diversos regímenes de velocidades. Vapor saturado Samson Modelo 3241, conexión de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, material interno acero inoxidable, sellos clase IV, (metal-metal), empaquetadura PTFE Carbono, Bonet estándar, de origen alemán, posicionador electrónico y digital modelo 3730-0, señal de mando 420 mA, IP 65, origen alemán.



**Figura 34. Válvula PID planta térmica piloto. [autores]**

### **Sobrecalentador eléctrico:**

Marca Ingenium, tipo espiral con resistencias eléctricas tipo cartucho de  $\frac{1}{2}$  pulgada, de diámetro, cada una de 1000w y 220 V, potencia total 6 KW (en 6 resistencias), diámetro de tubería de vapor 1 pulgada SCH 40 voltaje de equipo 220V trifásico. Fabricado en acero carbón y tubería de acero SCH 40, lana de vidrio y acabado del aislamiento térmico en acero inoxidable.



**Figura 35. Sobrecalentador planta térmica piloto. [autores]**

## Turbina de vapor de dos etapas

Marca Ingenium TV-01-2, de impulso tipo etapas de velocidad (curtis), capacidad de generación 2 KW a 6000 RPM, entrada de vapor parcial. Presión de operación máxima 10 bar (147 Psi). Vapor sobrecalentado, sistema de sellos tipo laberinto, rodamientos tipo sellados con características de juego interno C3 o C4.



Figura 36. Turbina de vapor planta térmica piloto [autores].

Todo el equipo se encuentra ubicado sobre plataformas firmes y robustas que permiten el desplazamiento de los diversos subconjuntos, tuberías y bandejas porta cables tipo industrial. Además, se contemplan elementos de instalación tales como chimeneas, a continuación, se puede observar el isométrico y unas vistas de la planta térmica.

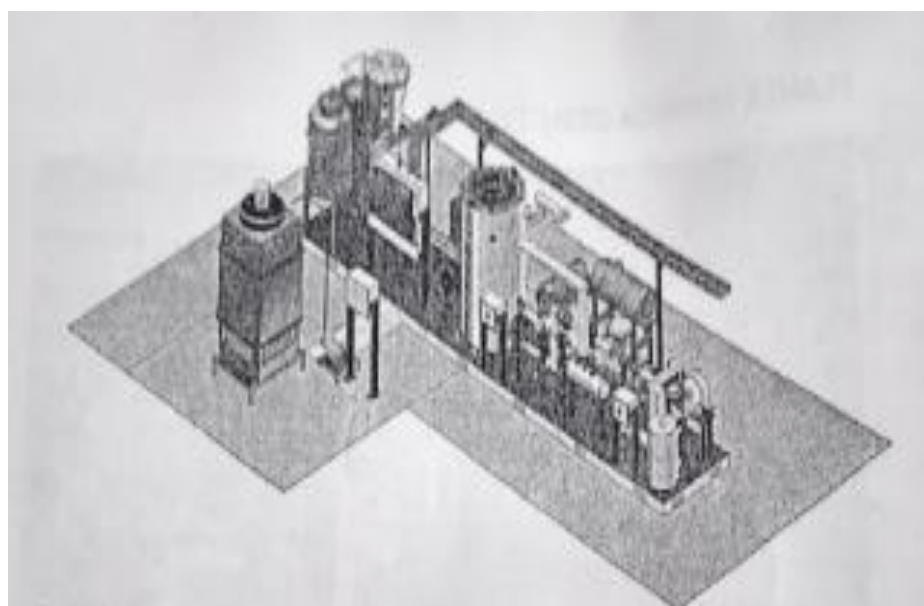


Figura 37. Isométrico planta térmica piloto Universidad ECCI [60]



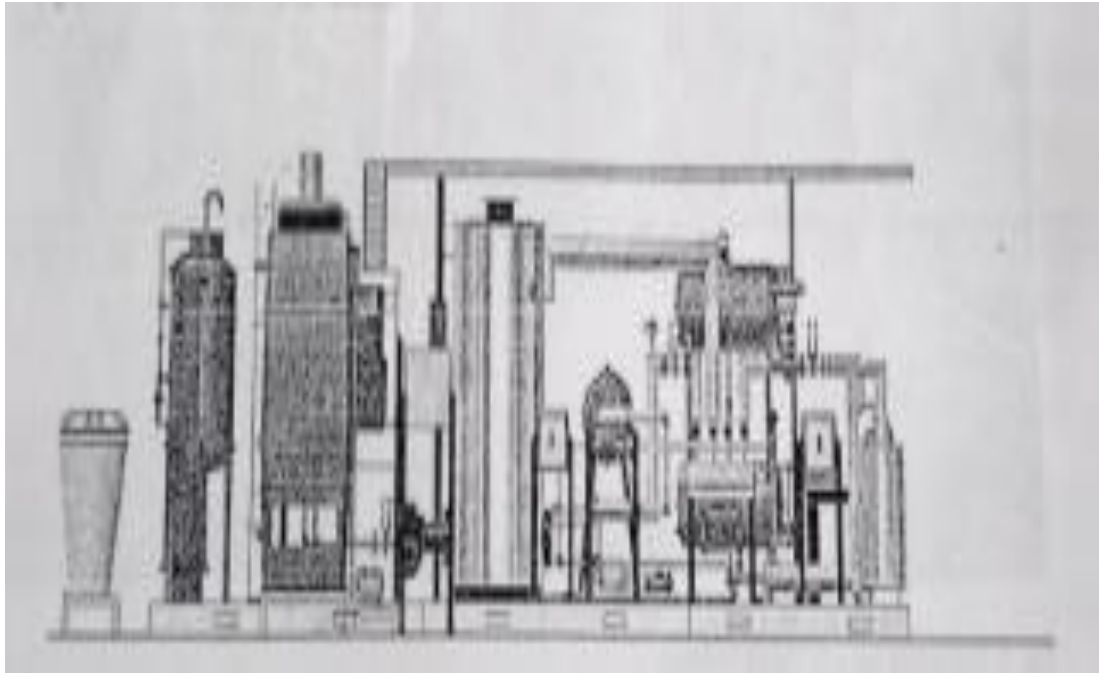


Figura 38. Vista frontal planta térmica piloto Universidad ECCL. [60]

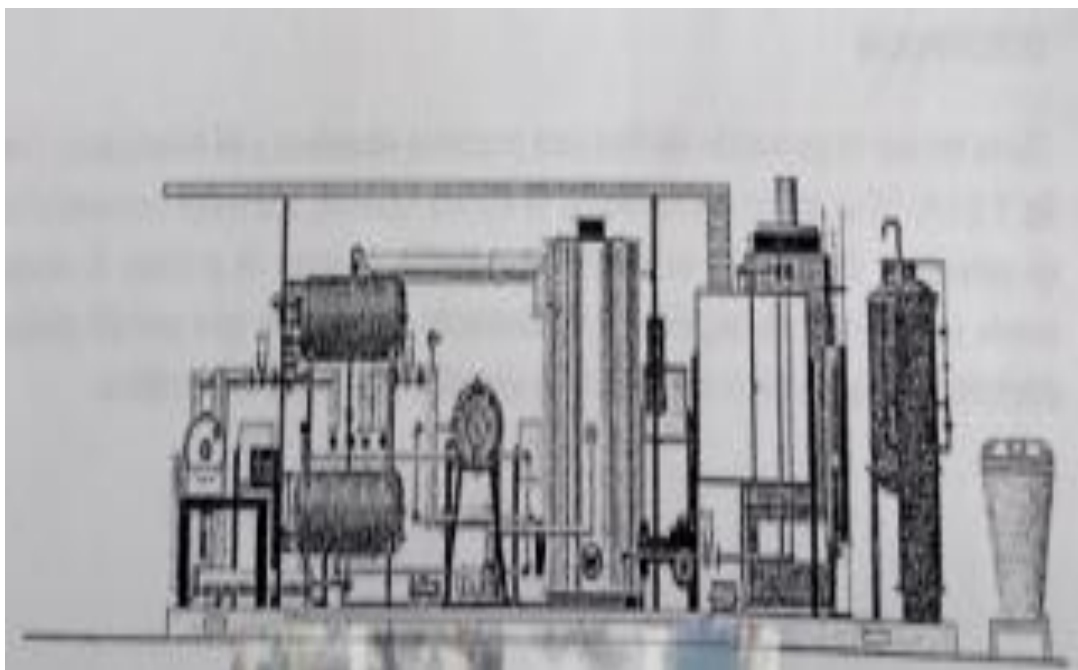


Figura 39. Vista posterior planta térmica piloto Universidad ECCL. [60]

### 3.4.1.3 ANALIZADOR DE EMISIÓN DE GASES

Para medir algunos de los componentes de los gases emitidos por la caldera de utilizó un analizador portátil de gases BACHARAC modelo PCA-65



Figura 40. Analizador de gases utilizado en las pruebas [autores]

#### Características:

Versátil analizador para muchas aplicaciones comerciales e industriales con hasta 4 sensores de gas ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$  y  $NO_2$ , entre otros)

Acondicionador de muestra activa que proporciona una precisión superior para bajo  $NO_x$  y otras aplicaciones

Dual Bluetooth® y la impresora IrDA permite a los técnicos para reproducir informes de combustión y emisiones en el campo

Rápido y fácil de B-Smart® sensor de reemplazo en el campo reduce el tiempo de inactividad y no requiere de gas de calibración

Tabla 13. Parámetros de medición analizador de gases

Parámetro	Exactitud de los Sensores	Rango de Medida
Oxígeno $O_2$	+/-0.3%	0 – 20.9 % Auto calibración
Temperatura ambiente °C	+/- 1%	0 - 537 °C
Temperatura de gases en Chimenea °C	+/- 15.5 entre 0 – 123 °C +/- 14.5 entre 124 – 249 °C +/- 13.5 entre 250 – 1093 °C	0 – 1093 °C
Monóxido de Carbono	+/-5%	0 – 2000 ppm
Presión de tiro en la chimenea.	+/- 1%	- 8 " - +8 in w.c.

Las condiciones ambientales de operación deben ser:  
 Temperatura ambiente 0–40 °C.  
 Humedad relativa 20 – 80 %.  
 Versatilidad. Impresora de puntos integrada.

Fuente: [autores]

**Características:**

- Rango de medida: 100 Kg F (LB, N)
- Resolución: 0.05 Kg F/0.05 LB/0.2 Newton
- Exactitud:  $\pm$  (0.5 % + 2 dígitos)
- Salida a PC:  $\pm$  (0.5 % + 2 dígitos)
- Alimentación: 6 x 1.5 VAA
- Control Zero y tara sobre la escala total

### 3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA

La evaluación se lleva a cabo a través de una muestra de biodiésel obtenida a nivel laboratorio y a nivel planta piloto en una corrida de 25 kilogramos (aprox. 29 litros)

Al biodiésel a nivel laboratorio se le realizará un análisis de varianza (ANOVA) simple entre las medias de las muestras por tratamiento con un nivel de significancia del 95% ( $\alpha=0,05$ ) para establecer si existen diferencias significativas de las variables en evaluación. En caso de no presentarse diferencias significativas entre las muestras se realizará una prueba de rangos múltiples.

Se emplearán diseños completamente aleatorizado con disposición factorial en el que se evaluarán el efecto de la concentración de catalizador y relación molar alcohol:aceite vegetal para la obtención de biodiésel a nivel laboratorio luego se realiza la caracterización física al biodiésel obtenido. A continuación, se fabrica el biodiésel a nivel planta piloto y se realiza la caracterización para comprobar que lo obtenido en laboratorio corresponde con la producción obtenida. Y posteriormente, se evaluarán los efectos de las mezclas entre diésel (B0) y biodiésel sobre el consumo y emisiones a la atmosfera en la planta térmica piloto junto con la potencia obtenida.

### 3.5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

#### 3.5.1.1. Diseño experimental del proceso de obtención de biodiésel a nivel laboratorio

La base del diseño experimental será el estudio del efecto de la concentración de catalizador y relación molar alcohol:aceite vegetal y su efecto en el rendimiento del biodiésel obtenido.

#### Hipótesis del diseño experimental.

Ha: La concentración de catalizador y la relación molar alcohol:aceite vegetal influyen en el rendimiento del biodiésel obtenido.

Ho: La concentración de catalizador y la relación molar alcohol:aceite vegetal no influyen en el rendimiento del biodiésel obtenido

En el diseño experimental se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- 1) Variables Independientes:  
Concentración y relación molar alcohol:aceite vegetal
- 2) Variables Dependientes:  
Rendimiento del biodiésel

Para estas variables se va a utilizar un Modelo factorial de  $2^2$  de la siguiente forma:

Factor A: Relación molar alcohol: aceite vegetal

1. 100E = Exceso de alcohol del 100% molar
2. 200E= Exceso de alcohol del 200% molar

Factor B: Concentración del catalizador

1. 1C= 1%
2. 1.5C= 1.5%

**Tabla 14. Modelo factorial obtención biodiésel**

Catalizador (B)	Relación alcohol: Aceite refinado de palma RBD (A)	
	A1	A2
B1	A1B11, A1B12, A1B13	A2B11, A2B12, A2B13
B2	A1B21, A1B22, A1B23	A2B21, A2B22, A2B23

Fuente : [autores]

Se efectuarán 3 ensayos para cada uno de los dos niveles de los factores que corresponden a las relaciones alcohol y ARP y porcentaje de catalizador lo cual

conlleva a un total de 12 mediciones de las variables de respuesta (rendimiento del biodiésel).

### Análisis estadístico

El modelo estadístico utilizado para el diseño general de 2 factores es:

$$Y_{ijl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijl}$$

Ecuación 2. Modelo estadístico factorial 2<sup>2</sup>

Para

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_{ijl}: 1 \\ j = 1, 2, \dots, b \\ l = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \end{array}$$

Dónde:

$Y_{ij}$  es la respuesta observada (Rendimiento del biodiésel) cuando el factor A esta al  $i$  em, y el factor B esta al  $j$  em,  $\mu$  es el efecto conjunto del total de las medias,  $\tau_i$  es el efecto  $i$  em nivel del factor fila A,  $\beta_j$  es el efecto del  $j$  em nivel factor columna B,  $(\tau\beta)_{ij}$  es el efecto de la interacción entre  $\tau_i$  y  $\beta_j$  y  $\varepsilon_{ijl}$  es el componente aleatorio del error.

Las hipótesis a probar se refieren a los efectos de los factores en las variables de respuesta  $Y_{ij}$ .

Ho:  $A_1 = A_i$ ; Ho:  $B_1 = B_j$ ; Ho:  $AB_1 = AB_{ij}$

Ha:  $A_1 \neq A_i$ ; Ha:  $B_1 \neq B_j$ ; Ha:  $AB_1 \neq AB_{ij}$

Para la evaluación de los resultados experimentales se efectúa un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95%. Se establecerá si existen o no diferencias significativas entre los tratamientos y se identificaran con letras si realmente se establece una diferencia estadística.

#### 3.5.1.2. Diseño experimental en la planta térmica piloto

Para los experimentos realizados (consumo, emisiones atmosféricas, aire en mezcla para la combustión y temperatura de los gases), se va a utilizar un modelo Anova Unifactorial completamente aleatorizado balanceado. [61]

Para decidir si las medias de los grupos pueden considerarse no iguales compara la variabilidad en cada grupo con la variabilidad entre los grupos.

$$\begin{array}{l} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..}) \\ \text{Desviaciones:} \end{array} = \begin{array}{l} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.}) \\ \text{intra-grupos} \end{array} + \begin{array}{l} (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..}) \\ \text{inter-grupos} \end{array}$$

**Ecuación 3. Análisis Anova unifactorial**

Elevando al cuadrado y sumando resulta:

$$\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_i \sum_j (\bar{y}_{ij} - \bar{y})^2$$

**Ecuación 4. Análisis Anova Unifactorial al cuadrado**

$$SCT = SCE + SCR$$

**Ecuación 5. Análisis Anova Unifactorial en términos cuadráticos**

que da una descomposición de la variabilidad total (en términos cuadráticos) como suma de la variabilidad residual más la variabilidad explicada por el modelo.

**SCE (Variación inter grupos):**

Suma de cuadrados explicada (variabilidad debida a que hay distintos niveles del factor)

$$\sum n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$$

**Ecuación 6. SCE (Variación inter grupos)**

**SCR (Variación intra grupos):**

Suma de cuadrados residual (variabilidad interna dentro de cada nivel)

$$\sum_i \sum_j (\bar{y}_{ij} - \bar{y})^2$$

**Ecuación 7. SCR (Variación intra grupos)**

**SCT (Variación total):**

Suma de cuadrados total (variabilidad total de todos los datos)

$$\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y})^2$$

**Ecuación 8. SCT (Variación total)**

**Descripción del modelo**

$$Y_i = \mu_i + U; i = 1, 2, \dots, I$$

$Y_i$  respuesta de la variable en el  $i$ -ésimo nivel del factor explicativo

$\mu_i = E(Y_i)$ : valor medio de  $Y_i$

$U$  es la variación aleatoria de  $Y_i$

Supondremos que  $U \sim N(0, \sigma)$ , por tanto,  $Y_i \sim N(\mu_i, \sigma)$   
 $\sigma^2 = \text{Var } U = \text{Var } Y_i$  igual para todo  $i$ .

**Elección del nivel del factor:**

Niveles fijos: Los tratamientos son seleccionados por el experimentador.

**Significancia:**

La significancia de cada fuente de variación se evalúa mediante

$$F = \frac{\frac{SCE}{I-1}}{\frac{SCR}{n-1}}$$

**Ecuación 9. Significancia Anova**

Entonces, el experimento tiene distribución F con  $I - 1$  y  $n - I$  grados de libertad.

Región de rechazo de  $H_0$  al nivel de significación  $\alpha$ :  $R = \{F > F_{I-1, n-I; \alpha}\}$

**Tabla de Anova**

Se debe indicar las fuentes de variación organizadas de la siguiente manera:

**Tabla 15. Resultados Anova**

Fuentes de variación	Sumas	g. l.	Varianza	Test F	p-val
Explicada	SCE	$I - 1$	$S_E^2 = \frac{SCE}{I-1}$	$F = \frac{SCE \cdot (n-I)}{SCR \cdot (I-1)}$	$p$
Residual	SCR	$n - I$	$S_R^2 = \frac{SCR}{n-I}$		
Total	SCT	$n - 1$			

[61]

**Fenómeno de interacción**

La interacción entre grupos se muestra en diagramas de caja en donde se pueden deducir si los grupos tiene o no, diferencias significativas

Entonces después de establecer el diseño experimental, se realizaron los siguientes diseños experimentales a las pruebas realizadas en la planta térmica piloto de la siguiente manera:

### 3.5.1.2.1. Consumo de biodiésel por mezcla

La base del diseño experimental será el estudio del valor del consumo de biodiésel en litros después de realizada la combustión de las mezclas de biodiésel en la planta térmica piloto durante un tiempo determinado.

H<sub>0</sub>: La mezcla de biodiésel afecta significativamente el consumo de combustible

H<sub>1</sub>: El consumo no depende de la mezcla de biodiésel utilizada

En el diseño experimental se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- 1) Variables Independientes:  
Mezcla de biodiésel (B0 a B100)
- 2) Variables Dependientes:  
Consumo de combustible

### 3.5.1.2.2. Diseño experimental de emisiones del biodiésel

La base del diseño experimental será el estudio del valor de la emisión de los gases después de realizada la combustión de las mezclas de biodiésel en la planta térmica piloto y su efecto en la atmósfera.

#### **Hipótesis del diseño experimental.**

H<sub>0</sub>: La mezcla diésel-biodiésel influye significativamente en la emisión de gases a la atmósfera.

H<sub>1</sub>: La mezcla diésel-biodiésel no influye significativamente en la emisión de gases a la atmósfera.

En el diseño experimental se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- 1) Variables Independientes:  
Mezcla de diésel-biodiésel
- 2) Variables Dependientes:  
Concentración de emisiones gaseosas en % o ppm de acuerdo al caso

### 3.5.1.2.3. Diseño experimental de la cantidad de aire (Xs) requerido para la combustión

La base del diseño experimental será el estudio de la cantidad de aire requerido para la combustión de biodiésel y su efecto en la mezcla.



### **Hipótesis del diseño experimental.**

H<sub>0</sub>: La mezcla diésel-biodiésel influye significativamente en el consumo de aire usado en el proceso de combustión.

H<sub>1</sub>: La mezcla diésel-biodiésel no influye significativamente en el consumo de aire usado en el proceso de combustión.

En el diseño experimental se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- 1) Variables Independientes:  
Mezcla de biodiésel
- 2) Variables Dependientes:  
Cantidad de aire

### **3.5.1.2.4. Diseño experimental de la temperatura de los gases emitidos por la combustión**

La base del diseño experimental será el estudio de la temperatura de los gases emitidos por la combustión del biodiésel y su efecto en el ambiente

### **Hipótesis del diseño experimental.**

H<sub>0</sub>: La mezcla diésel - biodiésel influye significativamente en la temperatura de los gases emitidos en el proceso de combustión.

H<sub>1</sub>: La mezcla diésel - biodiésel no influye significativamente en la temperatura de los gases emitidos en el proceso de combustión.

En el diseño experimental se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- 1) Variables Independientes:  
Mezcla de biodiésel
- 2) Variables Dependientes:  
Temperatura de los gases

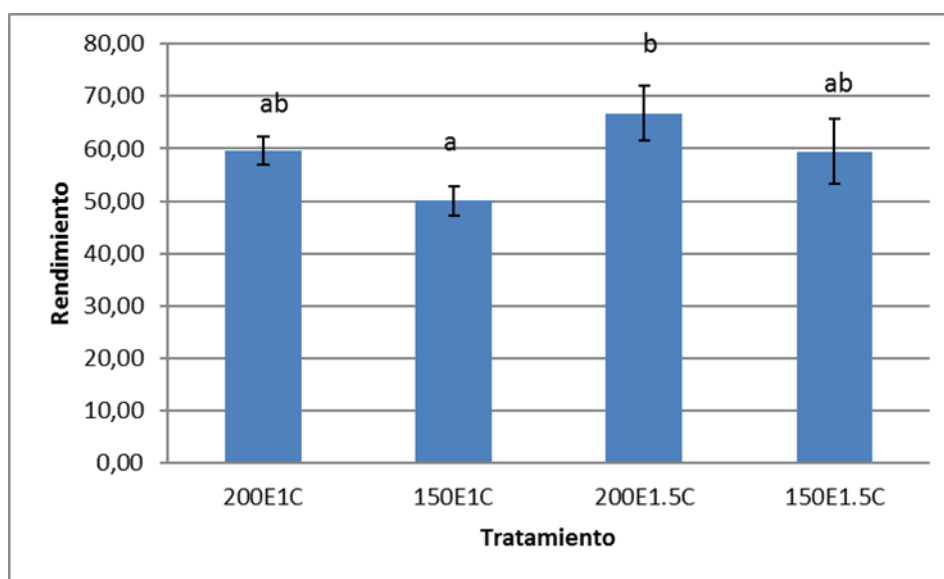
## CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A NIVEL LABORATORIO

En este apartado se mostrarán los resultados de las pruebas realizadas al biodiésel obtenido a nivel laboratorio para luego realizar la corrida de biodiésel para la producción de 25 Kg. en la planta piloto de la UNIVERSIDAD AGRARIA DE COLOMBIA – UNIAGRARIA, y que posteriormente fue utilizado en la planta térmica piloto de la UNIVERSIDAD ECCI.

#### 4.1.1. RESULTADOS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

En la siguiente gráfica se puede observar el resultado de la evaluación experimental del rendimiento de biodiésel para diferentes tratamientos (relación exceso de alcohol: catalizador)

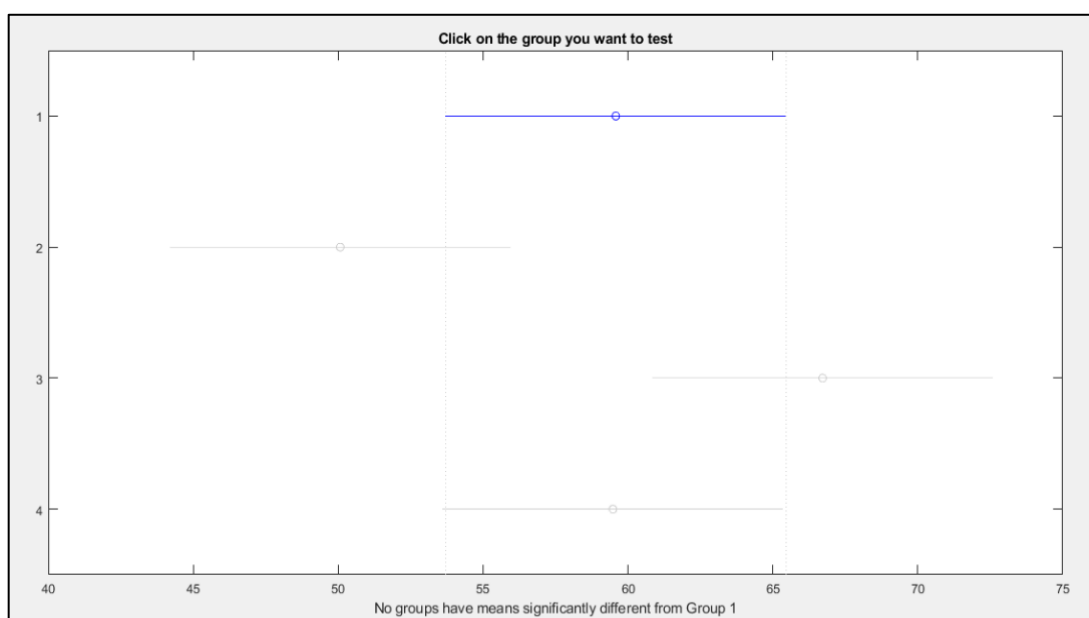


Gráfica 4. Efecto del porcentaje de catalizador y exceso de alcohol sobre el rendimiento de biodiésel. [autores]

Estadísticamente se pudo evidenciar la existencia de diferencias significativas ( $p=0.013$ ) para una significancia del 95%, respecto al porcentaje de rendimiento registrado para los tratamientos 150E1C (exceso molar del 150% y % de catalizador del 1% en peso del aceite) y 200E1.5C, por otro lado, no se presentaron diferencias en el porcentaje de rendimiento para los tratamientos 200E1C y 150E1.5C.

También se puede observar que el mayor rendimiento se obtuvo del tratamiento 200e1.5C (200% de exceso de alcohol con respecto al aceite de palma y 1,5%

catalizador) con un valor de  $66,7 \pm 5,24\%$ . Los tratamientos 200E1C y 150E1.5C presentaron rendimientos del  $59,6 \pm 2,75\%$  y  $59,5 \pm 6,15\%$  respectivamente, el tratamiento 150E1C fue el que reporto el menor rendimiento con un valor de  $50,7 \pm 2,81\%$ .



**Gráfica 5.** Interacción entre grupos de la producción de biodiésel a nivel laboratorio [autores]

De acuerdo a lo anterior, se procede a realizar la corrida de biodiésel con 200% de exceso de alcohol con respecto al aceite de palma y 1,5% catalizador y luego caracterizarlo para compararlo con la norma.

## 4.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO

Al biodiésel fabricado a nivel laboratorio laboratorio y en la planta piloto se le realizó el cálculo la densidad, el número ácido, la viscosidad cinemática y el punto de flama, de acuerdo a las normas técnicas y prácticas de laboratorio que están en los anexos de este documento. A continuación, se muestran los cálculos realizados., así:

### 4.1.2.1. NÚMERO ACIDO

En esta práctica se mide el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en 1 gr de muestra, este índice de acidez se expresa en miligramos por gramo.

**PROCEDIMIENTO (Ver anexo 1)**

Se tomó una muestra según el porcentaje esperado de acidez de acuerdo a la tabla 2, y se disolvió en 125 ml de solvente de titulación previamente neutralizado, con la solución de hidróxido de potasio. Luego se adicionaron 4 gotas de fenolftaleína como indicador.

Al tiempo se agitó la solución y se tituló con la solución de hidróxido de potasio hasta el punto final donde se obtuvo una solución transparente.

### **CALCULOS**

El índice de acidez es igual a:

$$\text{Índice de acidez} = \frac{56.1 * V * C1}{m}$$

**Ecuación 10. Índice de acidez**

Donde:

V=Volumen en mililitros de la solución volumétrica normalizada de hidróxido de potasio 4 ml.

C1= Concentración en moles por litro, de la solución volumétrica normalizada de hidróxido de potasio (0,1M).

m= Masa en gramos de la porción de ensayo

### **VALOR A NIVEL LABORATORIO**

$$\text{Índice de acidez} = \frac{56.1 * 20 * 0,1}{250}$$

$$\text{Índice de acidez} = 0,42 \text{mg de KOH/gde biodiesel}$$

### **VALOR A NIVEL PLANTA PILOTO**

$$\text{Índice de acidez} = \frac{56.1 * 32 * 0,1}{400}$$

$$\text{Índice de acidez} = 0,44 \text{ mg de KOH/g de biodiesel}$$

El valor ácido de un biocombustible debe aproximarse a un 0.5 mg KOH/g de biodiésel, de lo contrario es necesario realizar otro lavado adicional, en este caso no fue necesario

#### 4.1.2.2. DENSIDAD

Esta práctica permite medir la masa, a una temperatura específica, de un volumen de grasa o aceite de palma en un picnómetro, en el anexo 2 se describe la fórmula y la técnica para calcular la densidad.

$$\rho_{\theta} = \frac{m_3 - m_1}{V_d} + k(\theta_d - \theta)$$

Ecuación 11. Cálculo de la Densidad (Ver anexo 2)

### BIODISEL A NIVE LABORATORIO

➤ Ensayo: Aceite de palma- 1,5% Catalizador

Tabla 16. Densidad del biodiésel a nivel laboratorio

Peso del picnómetro vacío (gr)	Peso del picnómetro lleno (gr)	Masa del biodiésel (gr)	Volumen (ml)	Densidad (gr/ml)
17,03	39,39	22,36	26	871
17,03	38,46	21,43	27	873
17,03	40,48	23,45	30	881
Promedios	39,44	22,41	27,66	875
Desviación	1,01	1,01	2,08	5,29

[autores]

### BIODIÉSEL DE LA PLANTA PILOTO

Tabla 17. Densidad del biodiésel de planta piloto

Peso del picnómetro vacío (gr)	Peso del picnómetro lleno (gr)	Masa del biodiésel (gr)	Volumen (ml)	Densidad (gr/ml)
17,03	38,5	21,47 gr	25	885
17,03	40,68	23,65 gr	26	870
17,03	41,61	24,58 gr	28	873
Promedios	40,26	21,39 gr	26,33	876
Desviación	1,59	1,59	1,52	7,93

[autores]

### 4.1.2.3. VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Para realizar esta prueba, se cargó una muestra de biodiésel dentro del viscosímetro el cual se colocó a baño de maría en el receptáculo, con una temperatura gradual, hasta llegar a los 40°C, y mantener esta temperatura constante por un periodo de 10 minutos.

Posteriormente se realizó una succión al tubo N y se removió ligeramente el líquido por encima de la marca E del viscosímetro; para medir el tiempo se debe dejar que la muestra fluya libremente y se cronometra el tiempo que dura en pasar el flujo desde la marca E hasta la marca F, con porcentajes de catalizador al 1% y al 1.5%.

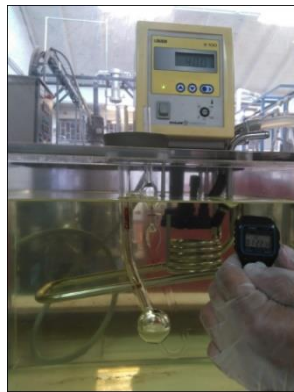


Figura 41. Toma de tiempo para calcular la viscosidad [autores]

El promedio de varias tomas de lecturas obtenidas proporciona la viscosidad cinemática.

- Viscosidad cinemática:

$$\gamma = C \times t$$

Ecuación 12. Viscosidad cinemática

Donde:

C= Constante del viscosímetro en  $\text{mm}^2/\text{s}^2$  (constante del viscosímetro a 40°C 0,008308  $\text{mm}^2/\text{s}^2$ ) (cSt/s)

t=tiempo en segundos de la lectura

- Viscosidad dinámica o absoluta:

$$\mu \text{ (mPa.s)} = \gamma \times \rho \times 10^{-3}$$

Ecuación 13, Viscosidad dinámica ó absoluta

Dónde:  $\mu$  = Viscosidad dinámica en mPa.s

$\gamma$  = Viscosidad cinemática en  $\text{mm}^2/\text{s}$

A nivel laboratorio se realizaron tres ensayos: Aceite de palma – 1.5% Catalizador

Tabla 18. Tiempos para viscosidad a nivel laboratorio

Nº Ensayo	Tiempo (en segundos)
1	580
2	573
3	578
Promedio	577
Desviación	3,6

[autores]

Cálculo:

$$\gamma = 0,008308 \frac{mm^2}{s^2} \times 577s = 4,8 \frac{cSt}{s}$$

$$\mu = 4,79 \frac{mm^2}{s^2} \times 875 \frac{Kg}{m^3} \times 10^{-3} = 4,19$$

A nivel planta piloto se realizaron tres ensayos: Aceite de palma – 1.5% Catalizador

**Tabla 19. Tiempos para viscosidad en planta piloto**

Nº Ensayo	Tiempo (en segundos)
1	585
2	580
3	575
Promedio	580
Desviación	5

[autores]

Cálculo:

$$\gamma = 0,008308 \frac{mm^2}{s^2} \times 580s = 4,81 \frac{cSt}{s}$$

$$\mu = 4,81 \frac{mm^2}{s^2} \times 875 \frac{Kg}{m^3} \times 10^{-3} = 4,2$$

#### 4.1.2.4. PUNTO DE FLAMA

Esta prueba se realizó en los laboratorios de la Universidad Agraria, utilizando los siguientes equipos de laboratorio (VER ANEXO 4).

- Equipo para punto de flama de copa cerrada
- Probeta de 100 ml
- Termómetro de 0 a 200°C
- Suministro de gas natural

Procedimiento:

Para el biodiésel a nivel laboratorio

a. Rampa de calentamiento

Se llenó la muestra de biodiésel hasta la línea específica de la copa del equipo; la temperatura debe estar por lo menos a 18°C por debajo de la temperatura de punto de flama esperada, debe remover el biodiésel eventualmente durante el proceso. Luego se ensambló la copa de prueba dentro del equipo, se aseguró la tapa a la copa y se insertó el termómetro en el orificio respectivo, posteriormente se ajustó el diámetro de la boquilla del quemador a 4.0 mm, y la presión del gas se graduó a 2.8 kPa.



**Figura 42. Llenado de copa para el cálculo de biodiésel [autores]**

El calor aplicado se realizó a una velocidad de incremento de 5 a 6°C / min.

La velocidad de agitación se mantuvo en un promedio de 110 rpm, para poder obtener buenos resultados.

b. Se aplicó la fuente de ignición cuando la temperatura de la muestra estaba en 162°C, es decir 23°C por debajo del punto de flama esperado, para este caso se esperaba que fueran 180°C, luego se repitió el proceso con otra nueva muestra, el dato aproximado de punto de flama obtenido (aparición de la flama) fue de 183°C a 184°C.





Figura 43, Medición del punto de flama. [autores]

c. Punto de flama corregido

$$\text{Punto de flama corregido } (^{\circ}\text{C}) = C + 0,033(760 - P)$$

**Ecuación 14. Punto de flama corregido**

Donde

C=Punto de flama observado  $^{\circ}\text{C}$

P=Presión barométrica en mm Hg

Luego:

$$\text{Punto de flama corregido } (^{\circ}\text{C}) = 183,5 + 0,033(760 - 720)$$

$$\text{Punto de flama corregido } (^{\circ}\text{C}) = 184,82 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Para la caracterización del biodiésel producido en la planta piloto se realizó el procedimiento anterior y se realizó el siguiente cálculo

d. Punto de flama corregido

$$\text{Punto de flama corregido } (^{\circ}\text{C}) = C + 0,033(760 - P)$$

Donde

C=Punto de flama observado  $^{\circ}\text{C}$

P=Presión barométrica en mm Hg

Luego:

$$\text{Punto de flama corregido } (^{\circ}\text{C}) = 185 + 0,033(760 - 720)$$

$$\text{Punto de flama corregido } (^{\circ}\text{C}) = 186,32 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

## 4.2. PRUEBAS REALIZADAS EN PLANTA TÉRMICA PILOTO

En las pruebas se utilizaron diésel puro (BO), biodiésel en diferentes mezclas con diésel (B10, B20, B30, B50, B70) y biodiésel puro (B100). Con estos tratamientos se midieron en la planta térmica piloto: el consumo de biodiésel por mezcla en el quemador de la caldera, las emisiones de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>x</sub> emitidas por las mezclas probadas, la mezcla de aire requerido para la combustión (Xs) y la temperatura de salida de gases de la caldera; por cada tratamiento.

### 4.2.1. CONSUMO DE BIODIÉSEL

Con el objetivo de comparar el volumen de combustible consumido por la caldera de la planta térmica piloto, se consultó su gasto volumétrico en condiciones de fábrica: presión de trabajo de 125 PSI (Tecnik Ltda., s.f.)

**Tabla 20. Consumo de combustible de caldera en condiciones de fábrica**

Propiedad	Magnitud	Unidades
Gasto volumétrico de ACPM (Diésel)	3,0	Galones (US)/hora
Gasto volumétrico de ACPM (Diésel)	0,18	litros/min

[62]

Entonces se procede a verificar la boquilla del quemador de la caldera y encontramos que la boquilla de combustible ha sido cambiada por una de mayor volumen, muy seguramente para adaptarla a las necesidades del laboratorio, por lo cual se decide recalcular el gasto de combustible mediante el aforo volumétrico de diésel (BO) al colocar en marcha la caldera con una presión de trabajo que oscila entre 100 y 120 PSI y una entrada de aire ajustada manualmente por medio de la mirilla de fuego.

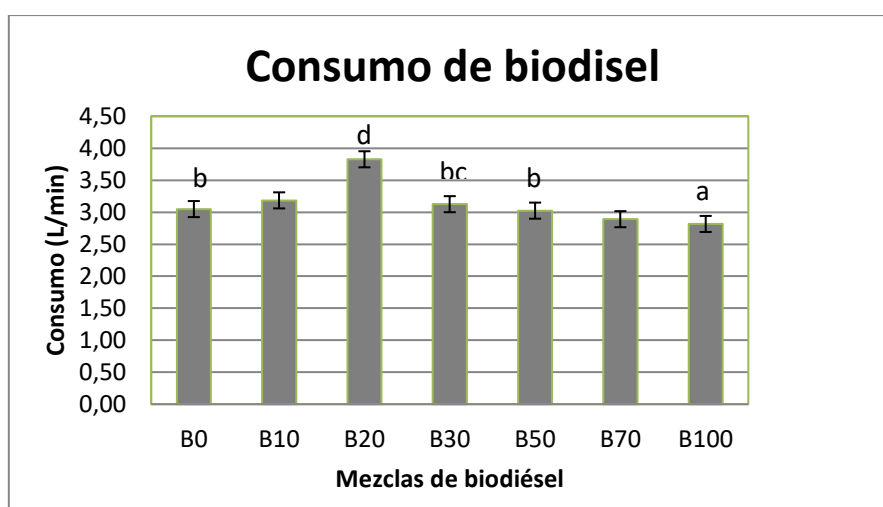
**Tabla 21. Aforo del consumo de diésel en caldera**

PROPIEDAD	MAGNITUD	UNIDADES
Hora de encendido	2:18	hr
Hora de apagado	2:33	ht
Tiempo de consumo	0:15	hr
Combustible disponible	49.53	l
Combustible remanente	3.78	l
Combustible consumido	45.75	l
Gasto volumétrico de diésel	3.0	l/min

[autores]

Por lo anterior se estima que se requiere para realizar las pruebas 210 l (55 gal) de diésel y de igual manera de biodiésel. Para la cantidad de biodiésel requerido, entonces se justifica ampliamente la producción del combustible en la planta piloto de la universidad UNIAGRARIA.

Después de realizar las pruebas con las diferentes mezclas, se obtuvieron los siguientes resultados con respecto al consumo de biodiésel en la caldera de la planta térmica en donde se mide el volumen de combustible consumido en un tiempo de un minuto por cada mezcla.

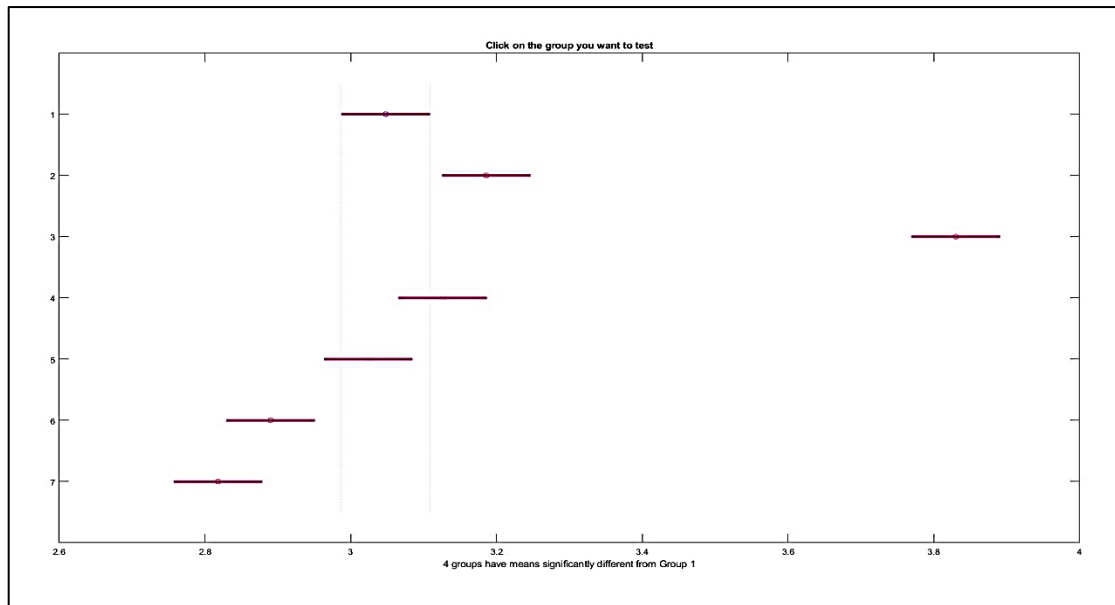


Gráfica 6. Consumo de biodiésel en la planta térmica piloto. [autores]

En la gráfica de consumo de biodiésel en la planta térmica piloto, se observa que la mezcla que tiene el consumo más alto es la mezcla B20 con 3,83 L/min., mientras que la mezcla B100 muestra el mejor rendimiento con 2.82 L/min.

También se observa que la dispersión de datos para cada muestra se encuentra ajustada y se observa que el consumo de biodiésel va en aumento desde la mezcla B0 a la mezcla B20 y luego el consumo mejora (disminuye) desde la mezcla B30 a la mezcla B100. Y también se observa que la dispersión de datos para cada muestra se encuentra ajustada mostrando que los datos pueden ser tenidos en cuenta.

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ver anexo 1).

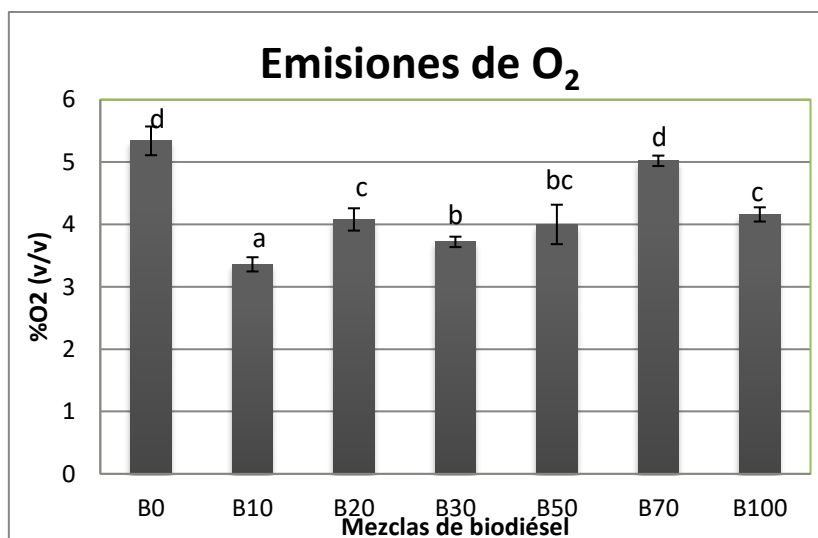


Gráfica 7. Interacción entre grupos del consumo de biodiésel. [autores]

Del diagrama de caja se observa que las mezclas B0 y B50 tienen un mismo comportamiento, al igual que las mezclas B70 y B100, pero las mezclas B10 y B30 tienen comportamiento independiente. Solo la mezcla B30 tiene comportamiento combinado entre la mezcla B0 y B10, lo que confirma el rechazo de la hipótesis nula.

#### 4.2.2. EMISIONES DE O<sub>2</sub> DEL BIODIÉSEL

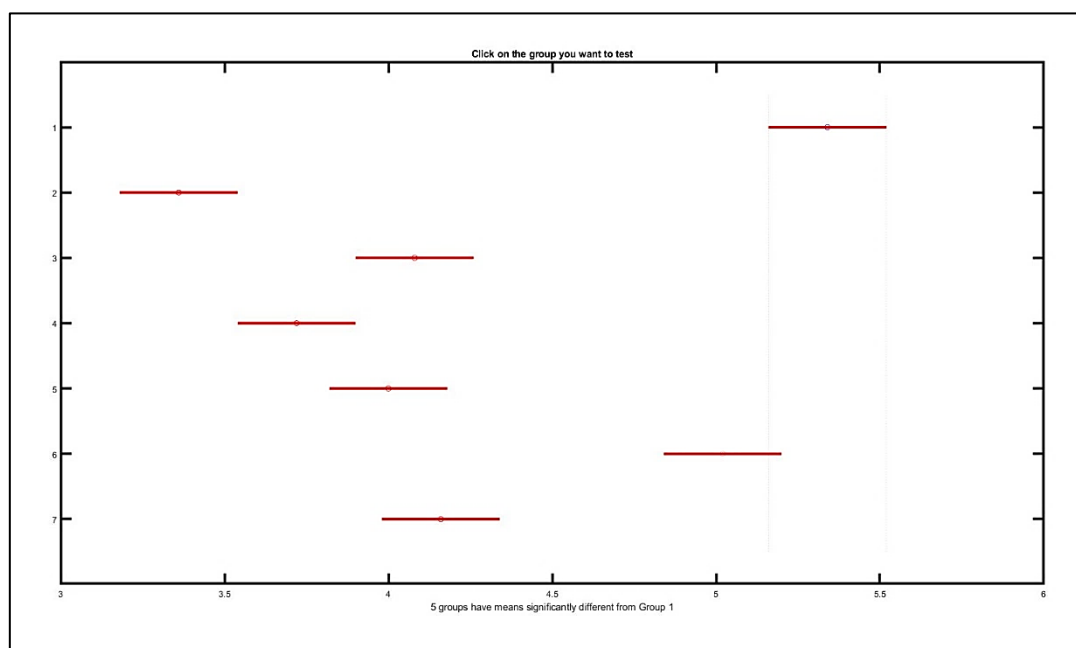
Utilizando el analizador de emisiones de gases en la chimenea de la caldera de la planta piloto de la Universidad ECCI, se muestran en la tabla 27 (ver anexo), los datos con respecto a las emisiones de O<sub>2</sub> (%) de cada una de las mezclas de biodiésel.



Gráfica 8. Emisiones de O<sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel [autores]

Las desviaciones estándar de todas las mezclas no se distorsionan por la presencia de datos extremos lo que establece que los datos no estén sesgados a un resultado que pueda ser de mala interpretación.

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (ver ANEXO 1).



**Gráfica 9. Interacción entre grupos de las emisiones de O<sub>2</sub> [autores].**

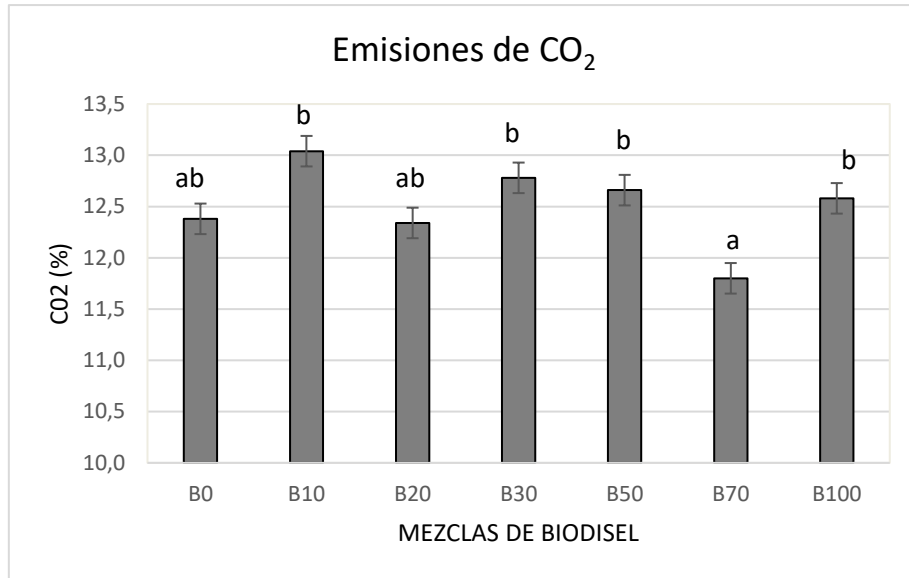
Del diagrama de caja se observa que las mezclas B0 y B70 tienen un mismo comportamiento, al igual que las mezclas B20 y B100, pero las mezclas B10 y B30 tienen comportamiento independiente. Solo la mezcla B50 tiene comportamiento combinado entre la mezcla B20 y B30, lo que confirma el rechazo de la hipótesis nula.

### 4.2.3. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> DEL BIODIÉSEL

Otro dato obtenido con el analizador de emisión de gases es el del CO<sub>2</sub> (%) cuyos resultados obtenidos se relacionan en la tabla 28 (Ver anexo 1).

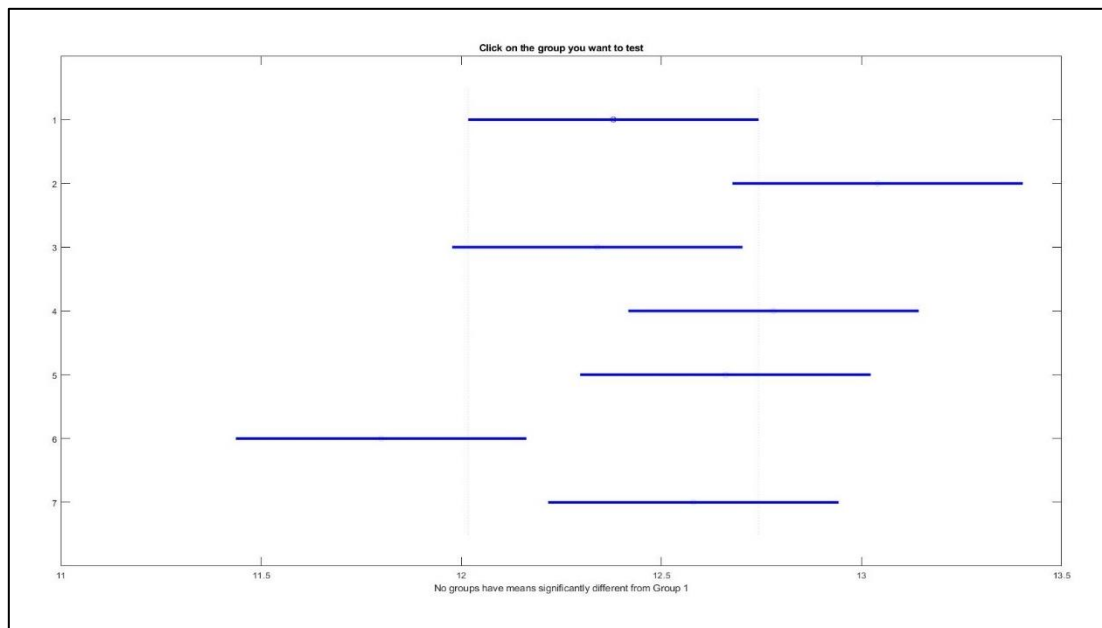
De la gráfica 10, se observa que la mezcla que más emite CO<sub>2</sub> al ambiente es la B10 (13.04%), las mezclas B30 (12.78%), B50 (12.66%) y B100 (12,58%) tienen emisiones similares; las mezclas B0 (12,38%) y B20 (12,34%) continúan en la escala con menos emisiones de CO<sub>2</sub>, pero la mezcla que menos envía emisiones al ambiente de CO<sub>2</sub> es la B70 (11,8%).

Todas las desviaciones estándar están por debajo de 1, lo que indica que los datos obtenidos no se encuentran sesgados, por lo tanto, los datos obtenidos están en rangos de buena calidad.



Gráfica 10. Emisiones de CO2 (%) por mezcla de biodiésel [autores]

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (ver ANEXO 1).



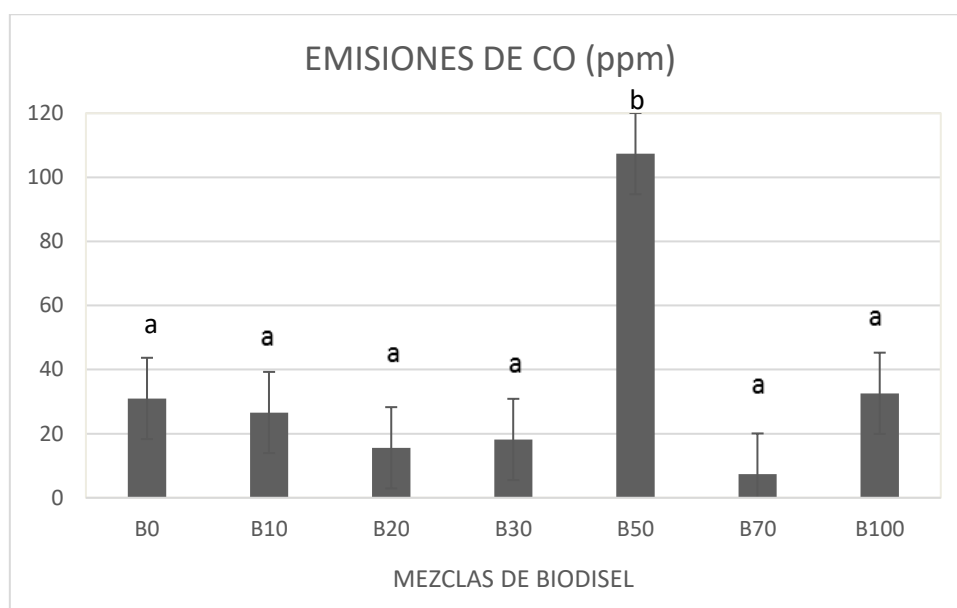
Gráfica 11. Interacción entre grupos de las emisiones de CO2 (%) de las mezclas de biodiésel [autores]

Del diagrama de caja se observa que las mezcla 70 tienen un comportamiento diferente a las demás, comparado con mezclas B10, B30 y B50 que tienen un comportamiento similar, y que las mezclas B0 y B50 tienen comportamiento combinado con respecto a las anteriores. A pesar de lo anterior, se confirma el rechazo de la hipótesis nula.

#### 4.2.4. EMISIONES DE CO DEL BIODIESEL

En cuanto a las emisiones de CO (ppm), los resultados obtenidos por mezcla con el analizador de emisiones se resumen en la tabla 29 (Ver anexo 1).

En la gráfica 12, se puede observar que la peor mezcla en cuanto a emisiones de CO (ppm) es la B50 con 107.4 ppm. A continuación, pero lejos del anterior resultado, se encuentran las mezclas B100, B0, y B10 con 32.6 ppm, 31 ppm y 26,6 ppm respectivamente. Las mezclas B30 y B20 continúan disminuyendo las emisiones con 18,2 ppm y 15,6 ppm, para finalmente encontrar que la mezcla con menor cantidad de emisiones de CO al ambiente es la mezcla B70 con solo 7,4 ppm.

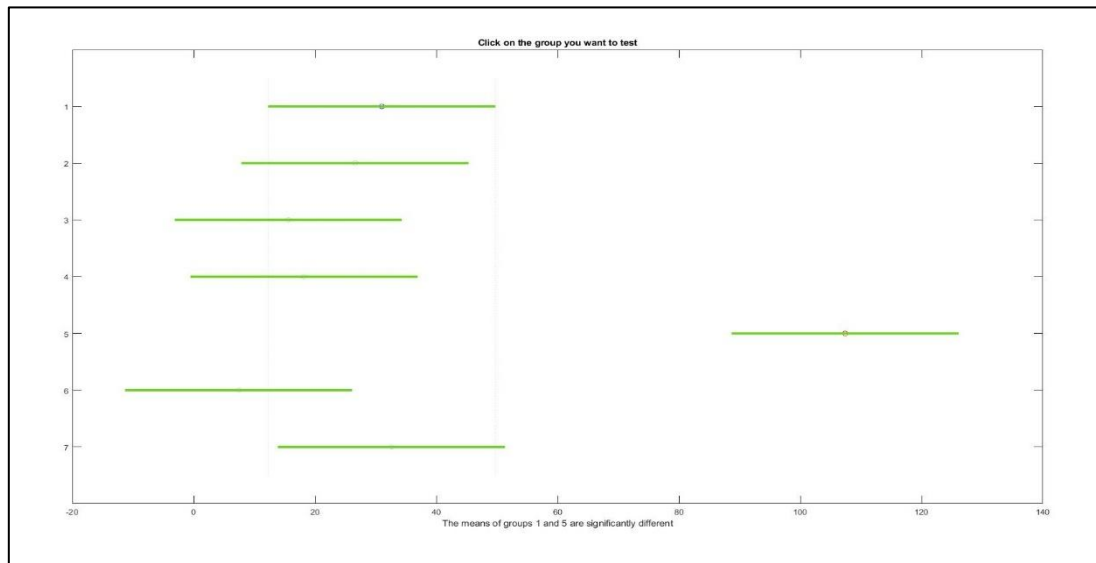


Gráfica 12. Emisiones de CO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]

En la mezcla B50 la desviación estándar está fuera de rango, lo que quiere decir que hubo algún problema con el experimento en esta muestra, por lo tanto no se debe tener en cuenta en los resultados; mientras que en los demás tratamientos, las desviaciones estándar están por debajo de 1, lo que indica que los datos obtenidos no se encuentran sesgados, por lo tanto, los datos obtenidos están en rangos de buena calidad.

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA (Ver ANEXO 1) muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias

significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula

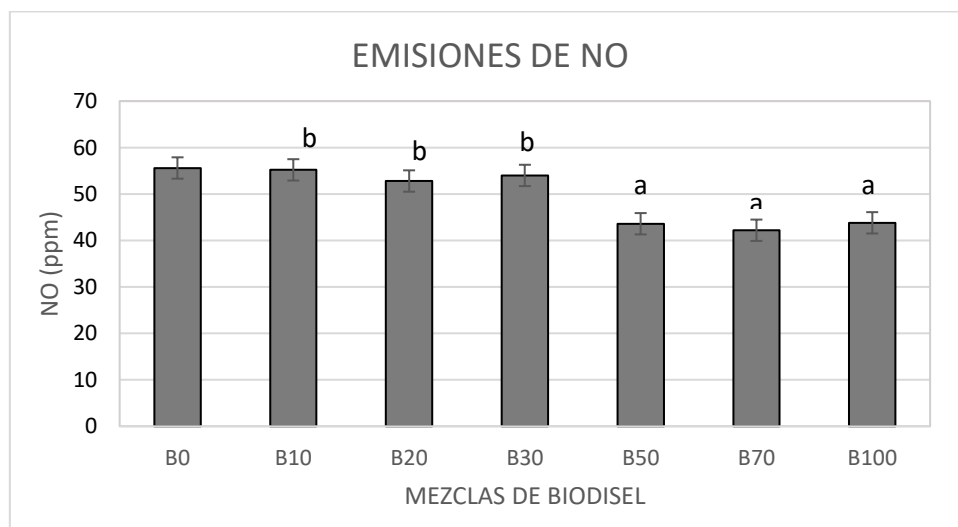


**Gráfica 13. Interacción entre grupos de las emisiones de CO de las mezclas de biodiésel [autores]**

Del diagrama de caja se observa que únicamente la mezcla 50 tiene un comportamiento diferente a las demás, sin embargo, las otras mezclas también tienen comportamientos diferentes entre sí, confirmando el rechazo de la hipótesis nula.

#### 4.2.5. EMISIONES DE NO DEL BIODIÉSEL

Siguiendo con lo que pretende este documento, se recolectaron los siguientes datos de las emisiones de NO (ppm) por mezcla de biodiésel en la tabla 30 (Ver ANEXO 1).



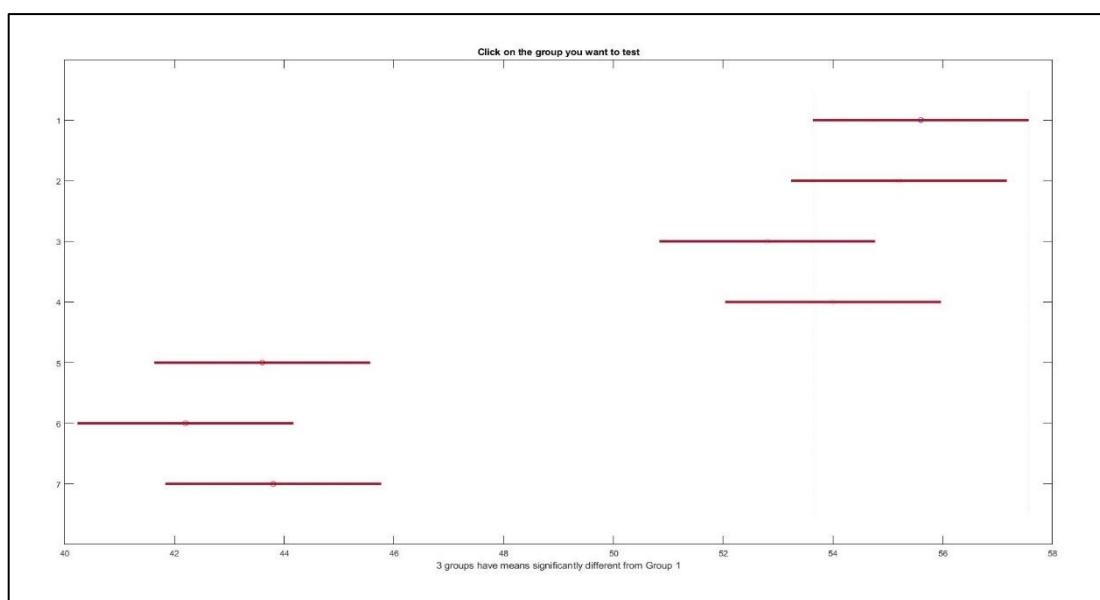
**Gráfica 14. Emisiones de NO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]**



De la gráfica 14, se observa que las emisiones de las mezclas B70, B50 y B100 son las más bajas, mientras que B20, B30 y B10, se asemejan a la emisión de la mezcla B0. La diferencia entre los dos grupos es de aproximadamente de 10 ppm, lo que no es muy significativo y no existe diferencia significativa en cuanto a estas emisiones.

Los datos de las mezclas B50 y B0 aunque dispersos en mayor cantidad que los datos de las demás mezclas, están en rangos aceptables comparados a los datos de las demás mezclas lo que permite tenerlos en cuenta.

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA (Ver ANEXO 1) muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula



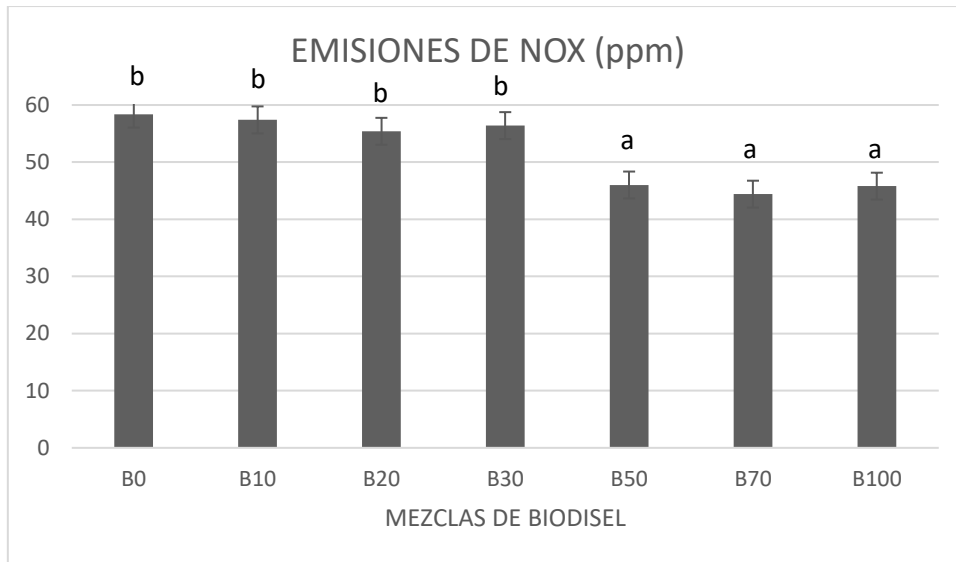
**Gráfica 15. Interacción entre grupos de las emisiones de NO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]**

Del diagrama de caja se observa que únicamente la mezcla 50 tiene un comportamiento diferente a las demás, sin embargo, las otras mezclas también tienen comportamientos diferentes entre sí, confirmando el rechazo de la hipótesis nula.

#### **4.2.6. EMISIONES DE NO<sub>x</sub> DEL BIODIÉSEL**

Y finalmente, en cuanto a emisiones al medio ambiente por las mezclas de biodiésel se obtuvieron los datos para el NO<sub>x</sub> (ppm) que se recopilan en la tabla 31 (Ver ANEXO 1).

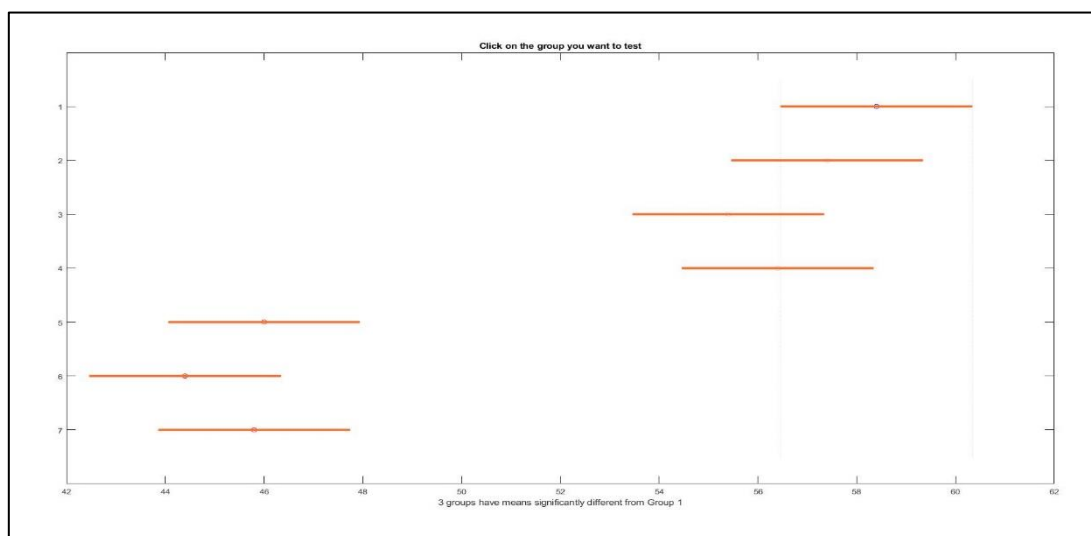
En la gráfica 16, se observa que el comportamiento es igual al de emisiones de NO (ppm) y las diferencias entre mezclas no son muy grandes, la mezcla que mayor emisión muestra es la B0 (58.4 ppm), seguida por la B10 (57.4 ppm), la B30 (56.4 ppm) y la B20 (55.4 ppm). Luego en otro rango se encuentran la B100 (45.8 ppm), B50 (46 ppm) y por último la B70 (44.4 ppm).



**Gráfica 16. Emisiones de NOx (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]**

Los datos obtenidos de los tratamientos tienen desviaciones estándar aceptables, lo que permite hacer comparaciones de buena forma y ser tenidos en cuenta dentro de los resultados.

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA (Ver ANEXO 1) muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

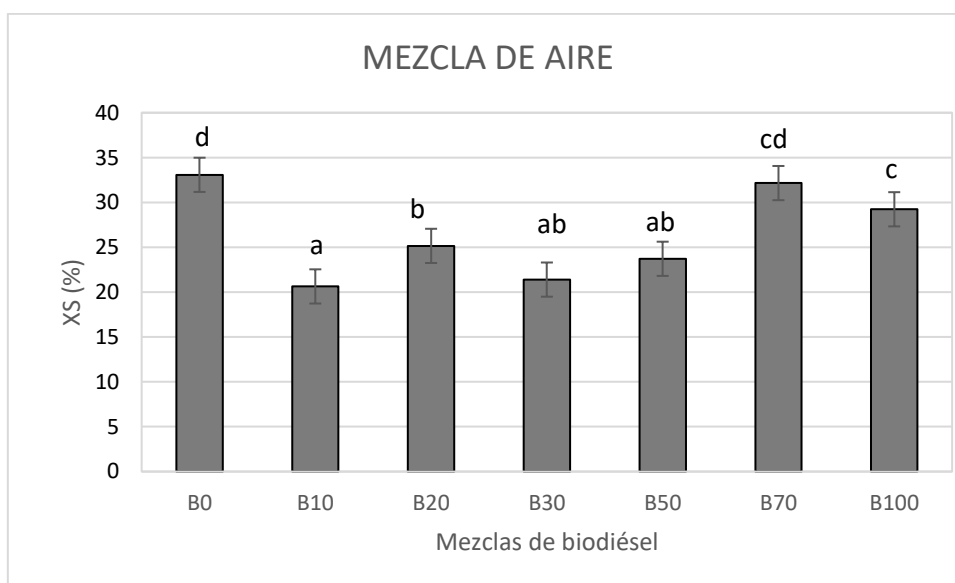


**Gráfica 17. Interacción entre grupos de las emisiones de NOx (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]**

Del diagrama de caja se observa que las mezclas B0, B10, B20 y B30 tienen un comportamiento similar entre ellas, mientras que las mezclas B50, B70 y B100 se comportan diferente a las anteriores, pero similarmente entre ellas. De acuerdo a estos comportamientos se confirma el rechazo de la hipótesis nula.

#### 4.2.7. CANTIDAD DE AIRE REQUERIDO PARA LA COMBUSTIÓN

Para realizar la combustión del biodiésel en el quemador de la caldera de manera óptima, se requiere de cierta cantidad de aire de combustión y en la tabla 32 se registran los porcentajes de esta variable (Ver ANEXO 1).

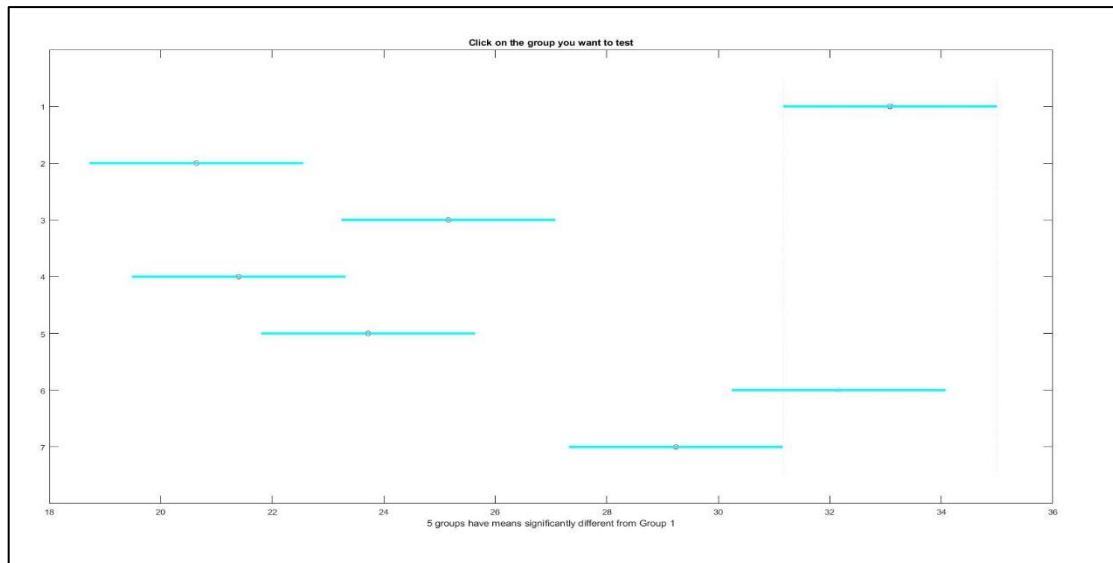


Gráfica 18. Cantidad de aire requerido para la combustión (XS) del biodiésel [autores]

En la gráfica anterior de la mezcla de aire requerida para la combustión, se ve que la mezcla B70 está al nivel de la mezcla B0 y que la B10 es la que menos requirió. En cuanto a las otras mezclas B20, B30 y B50 están aproximadamente entre 20% y 25% de aire requerido, mientras que la B100 se acercó a la B70.

Las desviaciones estándar indican que los datos se encuentran cercanos a la media por lo que los datos se pueden interpretar de manera confiable.

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA (Ver ANEXO 1), muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.



**Gráfica 19. Interacción entre grupos del aire requerido en la combustión del biodiésel por mezcla (XS.)**  
[autores]

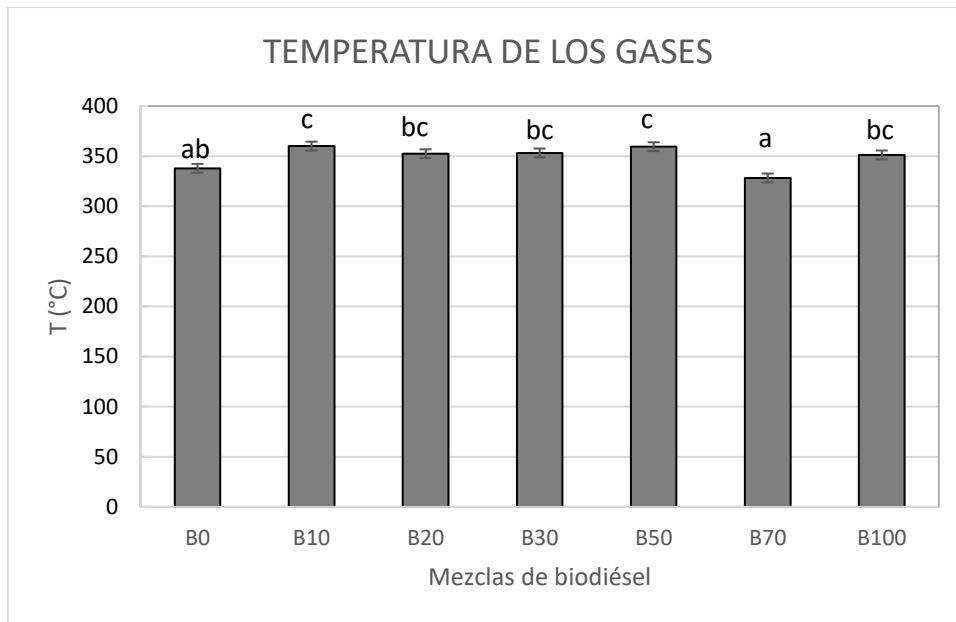
Del diagrama de caja se observa que las mezclas B0, B10, B20 y B100 tienen comportamiento independiente, mientras que las mezclas B30 y B50 se comportan como la mezcla entre B10 y B20, y la mezcla B70 se comporta como una combinación de B0 y B100. De acuerdo a estos comportamientos se confirma el rechazo de la hipótesis nula.

#### 4.2.8. TEMPERATURA DE SALIDA DE GASES (T)

Los resultados de las mediciones de temperatura de gases a la salida de la caldera después de realizada la combustión, se agrupan por mezcla de biodiésel en la tabla 33.

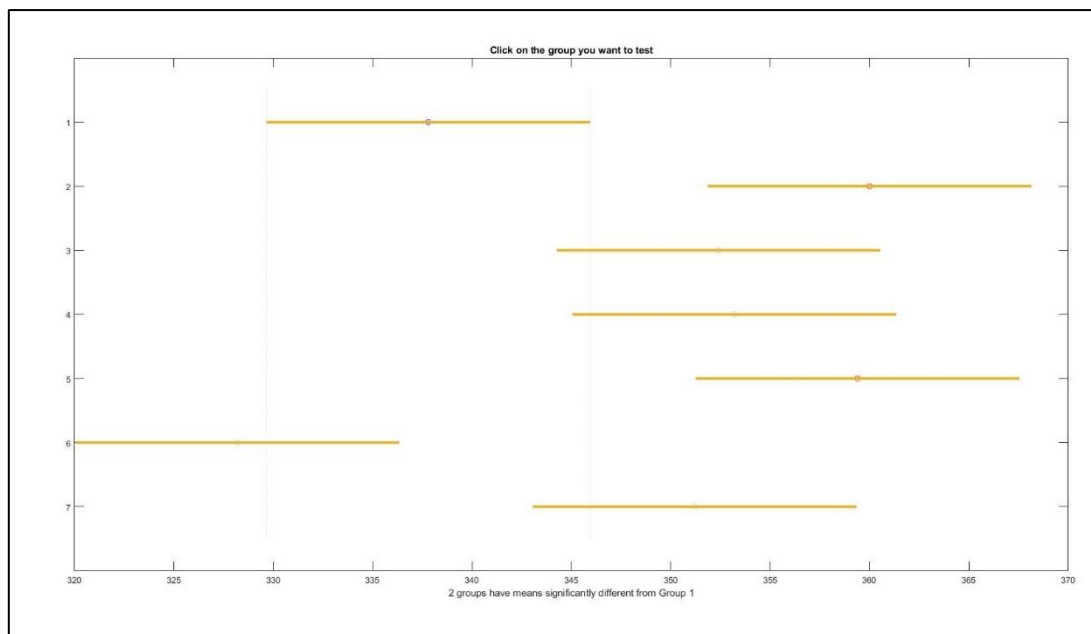
En la gráfica 20, se puede observar que el rango de temperatura de salida de gases está entre 337,8 °C de la mezcla B0 y 360 °C de la mezcla B10, estableciendo una diferencia de tan solo 22.2°C.

Las desviaciones estándar, aunque altas (debido a los valores altos arrojados por los tratamientos) indican que los datos se encuentran de manera aceptable, cercanos a la media por lo que los datos se pueden tener en cuenta dentro de los resultados.



**Gráfica 20. Temperatura de los gases (°C) del biodiésel. [autores]**

De la información reportada por MATLAB, se puede observar que el ANOVA muestra un valor de  $P < 0.01$  que indica que existen diferencias significativas entre los valores de las medias de los tratamientos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.



**Gráfica 21. Interacción entre grupos de la temperatura de salida de gases T (°C) por mezcla de biodiésel [autores]**

Del diagrama de caja se observa que la mezclas B70 se comporta de manera diferente a las demás mezclas, las mezclas B10 y B50 tienen comportamiento parecido

estableciendo el grupo C y las demás mezclas conforman el grupo bc. De acuerdo a estos comportamientos se confirma el rechazo de la hipótesis nula.

#### 4.2.9. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

##### POTENCIA ELÉCTRICA

La planta térmica cuenta con un tablero de 20 bombillos que son encendidos por la turbina de vapor con la que cuenta la planta térmica piloto. Cada bombillo es de 60 W y la turbina cuando se acciona alcanza su máxima velocidad y enciende el tablero con los bombillos. Para cada mezcla se realizó el conteo de bombillos encendidos y se multiplico por la potencia de cada uno para obtener el resultado mostrado en la siguiente tabla:

Tabla 22. Potencia eléctrica producida en planta piloto

PRUEBA	POTENCIA ELÉCTRICA (W)					
	MEZCLAS					
	B0	B10	B30	B50	B70	B100
1	600	600	600	590	600	590
2	590	590	590	590	600	600
3	600	580	600	600	600	600
PROMEDIO	596,67	590,00	596,67	593,33	600,00	596,67
DESVIACIÓN	5,774	10	5,774	5,774	0	5,774

[autores]

## **4.3. DISCUSIÓN**

### **4.3.1. BIODIÉSEL A NIVEL LABORATORIO**

El biodiésel obtenido a nivel laboratorio cumple con las especificaciones a la norma ASTM D 6751, mostrada en la table 2 del documento. Lo que nos permite realizar con certeza la corrida en la planta piloto de biodiésel para obtener 25 Kg de biodiésel de aceite de palma

### **4.3.2. BIODIÉSEL FABRICADO EN PLANTA PILOTO**

El biodiésel obtenido de la planta piloto también cumple con las especificaciones a la norma ASTM D 6751, lo que asegura que las mezclas que se obtuvieron sean de buena calidad y que las pruebas realizadas por mezcla de biodiésel sean confiables.

### **4.3.3. CONSUMO DE BIODIÉSEL EN PLANTA TÉRMICA PILOTO**

En comparación con el artículo de biodiésel de Atún en donde se realiza la medición de consumo en una caldera de similares características a la caldera de la planta piloto de la universidad ECCI, en esa caldera también debieron realizar aforo por modificaciones y encontraron que el consumo era de 0.29 l/min [62]. En el caso nuestro se confirma que las condiciones de fábrica se modificaron y que el aforo queda justificado con un estadístico confiable para realizar las pruebas.

De las pruebas realizadas se puede decir que la mezcla B100 tiene un 26,37% de mayor rendimiento sobre la mezcla B20. Esto quiere decir que en la caldera de la planta térmica de la universidad ECCI, se puede utilizar biocombustible de aceite de palma B70 y B100 con un 6.7% y un 8.4% mejor de rendimiento que la mezcla B0. Esto se traduce en que se consumen 128 galones de B100 por hora y con B0 consume 139 galones se estarían quemando 10 galones menos de combustible por hora.

En la gráfica de consumo de biodiésel (gráfica 6) se observó que el consumo de biodiésel va en aumento desde la mezcla B0 a la mezcla B20 y luego el consumo mejora (disminuye) desde la mezcla B30 a la mezcla B100.

En la literatura encontrada, se compara el quemador de la caldera vertical pirotubular con un quemador similar al utilizado para nuestras pruebas, el consumo de combustible para una mezcla B10 es igual a 0,342 L/min y para el B100 es igual a 0,282 L/min. [63]. Lo que demuestra que la caldera de la planta térmica de la ECCI, no está dentro de los rangos esperados pues el consumo promedio de combustible tiene en promedio de 3 l/min.

Además, en la literatura se encontró que el consumo de una caldera de 400 BHP [34], en donde fue factible económicamente el cambio de petróleo residual 6 por biodiésel, en donde se obtuvo un ahorro del orden de 103 nuevos soles por hora de operación, lo que asegura un retorno de la inversión inmediato, de solamente 1 mes, por el biodiésel. También en nuestro caso 10 galones por hora de operación equivalen aproximadamente a \$ 90.000 pesos que, en un día de operación de tan solo 12 horas, el ahorro estaría por el orden de \$ 1.080.000, que también justificaría utilizar el biodiésel fabricado en la operación de la caldera.

#### 4.3.4. EMISIONES ATMOSFÉRICAS

La primera emisión estudiada fue la del porcentaje de oxígeno ( $O_2\%$ ), en donde la B0 está en primer lugar, seguida por las otras mezclas en su orden (B70, B100, B20, B50, B30 y B10) que fueron disminuyendo esta emisión desde un 5% a un 3%. Esto significa que la concentración de oxígeno hacia la atmósfera no varió significativamente. Si la concentración de oxígeno fuera del 21% (como en el aire) la temperatura de la combustión sería aproximadamente de 360 °C y la combustión se hace de manera rápida [64], y comparado con lo que se obtuvo en las pruebas fue que en la temperatura de emisión de los gases estuvo cercana a este valor, por lo tanto las mezclas hicieron la combustión de manera mucho más rápida que la del B0 favoreciendo la reducción de las emisiones de los otros componentes del gas.

Con la segunda emisión analizada, correspondiente al dióxido de carbono ( $\%CO_2$ ) encontramos emisiones de 12.08% para el diésel y para el biodiésel varía entre el 13% (B10) y el 11% (B70), siendo esta última mezcla la única que se encuentra por debajo de la B0. Comparando los resultados con las pruebas realizadas en una caldera con biodiésel mezclado a partir de aceite de atún, se obtuvieron reducción de emisiones de  $CO_2$  entre el 9% para la mezcla B80 y del 1% para la mezcla B5 [62]. Esto quiere decir que en cuanto a la emisión de  $CO_2$ , con nuestras pruebas, en una caldera experimental similar, se alcanzaron los niveles de B5 [65]. Sin embargo, se hace significativo el 1% obtenido, si traducimos esto a kg de  $CO_2$ /kg de vapor de agua, por ejemplo, en una caldera de 400 BHP, al quemar biodiésel obtuvo 1.92 kg de  $CO_2$ /kg contra 2.70 kg  $CO_2$ /kg al quemar residual número 6, es decir redujo en el orden del 28% el  $CO_2$  evacuado al medio ambiente [34] y para la caldera de 20BHP utilizada en nuestro caso se puede reducir 1 kg de  $CO_2$ /20 kg de vapor de agua. [45]

En cuanto a la tercera emisión probada, en este caso CO (ppm), la emisión de la mezcla B50 no puede ser tenida en cuenta de acuerdo a la desviación estándar obtenida, y comparando los resultados obtenidos con los ensayos realizados en una caldera en donde quemaron biodiésel y aceite térmico en donde encontraron valores de las emisiones de CO son inferiores en hasta un 90% [53]. En el caso de las pruebas realizadas para este documento, la emisión medida de CO para el B0 fue de 31 ppm y para las mezclas de biodiésel estuvieron entre 7 ppm y 32 ppm, obteniendo una



reducción máxima del 22.5% con la mezcla B70. Y es probable que la mayor concentración de CO para el B0 se deba al mayor contenido de carbono en peso del diésel en relación con el biodiésel [65].

Por otro lado, en cuanto a las emisiones de NO, en la literatura no se encuentran estudios de emisiones de este gas, pero en este estudio se muestra en la gráfica 15, que las diferencias en cuanto a emisiones de NO (ppm) no son muy grandes pues la mezcla que mayor emisión es la B0 (55,6 ppm), seguida por la B10 (55,2 ppm), la B30 (54 ppm) y la B20 (55.2 ppm). Luego en otro rango se encuentran la B100 (43,8 ppm), B50 (43,6 ppm) y por último la B70 (42,2 ppm) por lo tanto hubo una reducción entre la B0 y la B70 del 24.1% de emisiones de NO a la atmósfera.

Pasando ahora a las emisiones de NO<sub>x</sub>, en el mismo artículo de comparación de emisiones entre biodiésel y aceite térmico en una caldera [53], se nota un ligero aumento de emisiones de NO<sub>x</sub> en el caso del biodiésel comparado con el aceite térmico. También muestra la comparación entre autores en donde el aumento de emisiones de NO<sub>x</sub> está relacionada con el ajuste del quemador y la cámara de combustión. Menciona que Wen Lee detectó NO<sub>x</sub> similar o ligeramente superior con biodiésel con respecto al diésel mientras que Batey y Krishna muestran que el biodiésel produce 10-20% menos de NO<sub>x</sub> en comparación con el aceite térmico, siempre que el exceso de aire para ambos combustibles sea el mismo. En el caso de este documento el diésel emite 58 ppm de NO<sub>x</sub> y las mezcla que menos emite NO<sub>x</sub> es la B70 con 44 ppm equivalente a una reducción de 25.52% muy superior a la investigación realizada previamente.

Antes de terminar la discusión, debemos analizar la cantidad de aire requerido (XS) para la combustión, variable muy importante para la calibración de la emisión de gases. En la gráfica 18, se observa que la mezcla que requiere de menor cantidad de aire para realizar la combustión es la B10 con el 20,64% seguida muy de cerca por la mezcla B30 con el 21.4%. Las mezclas B50 y B20 requieren del 23.72% y 25,16% de aire y las B100, B70 y B0 son las que mayor cantidad de aire requieren con el 29.24%, 32,16% y 33.08% respectivamente. Este resultado tiene relación directa con los resultados de las emisiones de CO<sub>2</sub>, pues a menor aire requerido mayor emisión de CO<sub>2</sub>, haciendo la combustión imperfecta. A mayor aire en la mezcla mayor es la emisión de O<sub>2</sub> (B70) y se disminuyen las emisiones de CO, NO y NO<sub>x</sub>.

Por último, ya se evidencio que la temperatura de emisión de los gases de combustión no supera los 360°C, pues en el momento de la combustión la emisión de CO<sub>2</sub> está al máximo y la de O<sub>2</sub> al mínimo, lo que hace que la atmósfera reciba estos gases calientes, pero sea capaz de bajarles la temperatura y reducir los problemas de efecto invernadero.

A manera de resumen se presentan en la siguiente tabla los valores promedios obtenidos por mezcla de cada una de las variables medidas.

**Tabla 23. Resumen de las pruebas de consumo y emisiones de biodiésel**

VARIABLE	MEZCLA DE BIODIÉSEL						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
Consumo (l/min)	3,05	3,19	3,83	3,13	3,02	2,89	2,82
O2 (%)	5,34	3,36	4,08	3,72	4	5,02	4,16
CO2 (%)	12,38	13,04	12,34	12,78	12,66	11,8	12,58
CO (ppm)	6,92	6,53	6,75	6,54	6,56	6,57	6,52
NO (ppm)	55,60	55,20	52,80	54,00	43,60	42,20	43,80
NOx (ppm)	58,4	57,4	55,4	56,4	46	44,4	45,8
XS (%)	27,73	27,11	26,27	26,69	22,56	22,00	22,57
T (°C)	337,8	360	352,4	353,2	359,4	328,2	351,2

[autores]

#### 4.3.5. POTENCIA

La potencia producida por la caldera de la planta térmica siempre es igual y no depende de la mezcla de biodiésel utilizada. La caldera siempre producirá la misma cantidad de vapor para mover la turbina y que esta a su vez encienda el tablero de potencia.

## CAPITULO V

### 5.1. CONCLUSIONES

El biodiésel producido en la universidad Uniagraria tiene ventajas tales como, que es menos contaminante para el medio ambiente que el diésel de origen fósil, debido a que su punto de inflamación es más alto (130°C) comparado con el diésel del petróleo (52°C) [66], es biológicamente activo, biodegradable comparado con el diésel, el cual es de difícil degradación, las emisiones de CO son inferiores debido a la demora de encendido, en cuanto al poder calorífico el biodiésel es en promedio un 9% inferior, mientras que sus desventajas son los costos de producción los cuales en la actualidad son mayores comparados al diésel, debido a la tecnología que se utiliza y el volumen de producción, los cuales en general son bajos para la demanda energética requerida.

La utilización de Etanol como catalizador, garantiza la fabricación de un biocombustible 100% renovable, de origen natural, y amigable con el medio ambiente, este catalizador se extraído de la caña de azúcar, permite una producción constante minimizando el riesgo de desabastecimiento, en contraparte se tiene al Metanol, el cual es de origen fósil, no renovable, ni sustentable para el medio ambiente y tendiente a desaparecer en el momento de terminarse las reservas de petróleo.

La mezcla de biodiésel-diésel más eficiente en cuanto al consumo es la B100, pues esta, frente a la mezcla B20, la cual resulto ser la menos eficiente, en términos de porcentaje se tiene que el rendimiento de la mezcla B100, en un 26,45% más eficiente que la mezcla B20.

De acuerdo a las mediciones realizadas en la planta térmica se evidencia que la mezcla que emite mayor porcentaje de O<sub>2</sub> al medio ambiente fue la B0, con un porcentaje de 5,34%, mientras que la de menor emisión de O<sub>2</sub> fue la mezcla B10 con un 3,36%, pero en general las demás mezclas están en un promedio del 4%, lo cual es un porcentaje ligeramente inferior al diésel común.

En cuanto al CO<sub>2</sub>, la mezcla menos favorable para el medio ambiente es la B10, con una emisión del 13,04%, en contraparte la mezcla que emite menor cantidad de CO<sub>2</sub> al medio ambiente fue la B70, con un porcentaje del 11,8%, las demás mezclas no tienen una variación significativa, ya que en promedio están alrededor del 12,5%, esto implica que el biocombustible fabricado es de buena calidad.

Las emisiones de NO (ppm) fluctúan entre 55,6 (ppm) de la mezcla B0, y 42,2 ppm de la mezcla B70, las demás mezclas están dentro de estos dos rangos, con un promedio de 55 ppm, los resultados no son dispersos y las emisiones no son significativas.

En general se logró fabricar un biodiésel a partir de aceite refinado de palma, mediante transesterificación, utilizando como catalizador Etanol, el cual tiene propiedades similares al diésel tradicional de origen fósil, y cumple con las normas ASTM D 6751

y NTC 5444, para combustibles en Colombia, su funcionamiento en la planta térmica determinó que es óptimo, y la emisión de gases también se ajustan a las normas técnicas establecidas para los combustibles.

La tecnología utilizada, combustión directa de biolíquido en calderas de baja potencia, es una tecnología ampliamente desarrollada y usada para combustibles fósiles, sobre todo en zonas rurales sin acceso al gas natural, que utilizan como combustible el gasóleo, lo que permite poder utilizar directamente los equipos de generación sin ninguna transformación dando a las instalaciones una flexibilidad de uso en función de las condiciones sociales, económicas y políticas.

## 5.2. PROSPECTIVA

Teniendo en cuenta que los costos de producción del biodiésel son entre 1, 5 y 3 veces más altos que para el diésel fósil [49]. Existirá el momento en el cual el biodiésel será un combustible industrial y automotriz razonablemente disponible en un futuro cercano si se mantiene el incremento de los precios de la gasolina y el diésel fósil en todos los escenarios internacionales.

Se debería realizar más publicidad al uso de biodiésel, teniendo en cuenta las exenciones fiscales, para que los biocombustibles se vuelvan más competitivos en próximos años.

En cuanto a este trabajo, a futuro se pueden realizar trabajos sobre la planta térmica piloto en donde se pueda tener un medidor directo de potencia mecánica en donde al variar el flujo de vapor de la caldera se pueda establecer de manera exacta esta variable.

Otra condición para mejorar este trabajo sería también elaborar un mecanismo de freno de la turbina en donde la medida del dinamómetro se pueda tomar de manera exacta.

En cuanto a las emisiones ambientales y basándonos en el protocolo para la vigilancia y control de contaminación atmosférica por fuentes fijas en Colombia, que recomienda un muestreo de 1 hora continua, para poder determinar la media de las emisiones en una fuente fija y dejar funcionando la planta térmica durante un día para cumplir la Resolución 2254 de 2017 y medir la concentración máxima permitida para CO.

Y también se propone realizar un proyecto similar sobre el estudio con las mezclas entre el ARP obtenido con un aceite vegetal usado (previa refinación), para obtener un comparativo y observar si el efecto puede ser de utilidad al ambiente porque podría dársele un uso alternativo a este último aceite producido industrialmente.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Torossi, "Reacciones en contexto : la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado," *An. la Real Soc. Española Química*, vol. 102, no. 3, pp. 43–49, 2006.
- [2] S. Vásquez, "Lo que hay detrás del negocio de la Palma de Aceite," *Agronegocios e industria de alimentos*, 2016. [Online]. Available: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/03/21/lo-que-hay-detras-del-negocio-de-la-palma-de-aceite/>. [Accessed: 20-Jun-2018].
- [3] V. A. Yate Segura, "Evaluación del proceso de extracción del aceite de *Jatropha curcas* L. para la producción de biodiésel," Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [4] M. A. Sierra S, "Evaluación del potencial de diferentes materias primas para la industria de biocombustibles," *UNIAGRARIA*, pp. 1–31, 2017.
- [5] R. Ximhai, C. Castro-Martínez, ; Laura, I. Beltrán-Arredondo, and J. Carlos Ortiz-Ojeda, "Producción de biodiesel y bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética? PRODUCCIÓN DE BIODIESEL Y BIOETANOL: ¿UNA ALTERNATIVA SUSTENTABLE A LA CRISIS ENERGÉTICA?," vol. 8, pp. 93–100, 2012.
- [6] Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, "Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia," *Indicadores*, 2015. [Online]. Available: <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2949.htm>. [Accessed: 20-Jun-2018].
- [7] M. de A. y D. Sostenible, "Protocolo de Kioto." [Online]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/458-plantilla-cambio-climatico-14>. [Accessed: 20-Jun-2018].
- [8] F. Osorio Múnera, Juan David; Correa Restrepo, "Valoración económica de costos ambientales: Marco conceptual y métodos de estimación," *Semest. Económico*, vol. 7, no. 13, pp. 159–193, 2004.
- [9] ASTM D6751-15c, "Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels," *ASTM Int.*, vol. i, pp. 1–11, 2010.
- [10] BP, "BP statical Reviw of world energy," *BP*, p. 56, 2018.
- [11] ZUÑIGA MOBARAK MAXIMILIANO, "SIMULACIÓN DE UN REACTOR QUÍMICO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE LA TRANSESTERIFICACIÓN DE ACIETE DE JATROPHA," INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2014.
- [12] U. Unidad de Planeación Minero Energética, "Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia, Ministerio de Minas y Energía - República de Colombia." 2013.
- [13] Enersinc, "Energy Demand Situation in Colombia," 2017.
- [14] N. Esteve Gómez, "Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica," Pontificia Universidad Javeriana, 2011.
- [15] A. Flórez, Hernán Jorge;, T. O. David, C. Quintero, and A. Gustavo., "Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional," *Cuad. Adm.*, vol. 22, pp. 219–245, 2009.
- [16] A. C. D. V. Pardal, "Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis," *IPBeja Repos. Científico*, pp. 1–323, 2012.
- [17] K. V. Rodríguez Neyra and L. M. Villanueva Aliaga, "Producción de biodiesel a partir de aceite vegetal usado en fritura por medio de la transesterificación de metanol.," *Univ. Nac. Trujillo*, pp. 1–75, 2011.
- [18] H. García-Romero and L. Calderón-Etter, "Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia." 2012.

- [19] U.S. Department of Energy, "Alternative Fuels Data Center: Natural Gas Fuel Basics," 2014. [Online]. Available: [https://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel\\_basics.html](https://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_basics.html). [Accessed: 17-Jul-2018].
- [20] I. Retana and J. Bonilla, "Transferecia tecnológica sobre las ventajas y desventajas de la utilización de biodiesel," p. 44, 2008.
- [21] M. . FORERO, M. . GNECCO, and M. . TORRES, "PRODUCCIÓN DE BODIESEL DE MORICHE (*Mauritia flexuosa*) COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA LAS REGIONES APARTADAS DE LA ORINOQUIA COLOMBIANA," *Orinoquia*, vol. 7, no. 1, pp. 59–69, Jan. 2003.
- [22] F. A. Avellaneda Vargas, "Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal," *Univ. Rovira i Virgili*, pp. 1–244, Aug. 2010.
- [24] N. K. Patel, P. S. Nagar, and S. N. Shah, "Identification of Non-edible Seeds as Potential Feedstock for the Production and Application of Bio-diesel," vol. 3, no. 4, pp. 67–78, 2013.
- [25] F. OLMEDO, "Producción de biodiesel con aceite de *Jatropha Curcas* - BiodiSol," *UNESCO BRASIL*, 2010. [Online]. Available: <http://www.biodisol.com/biocombustibles/produccion-de-biodiesel-a-partir-de-aceite-de-jatropha-curcas/>. [Accessed: 19-Mar-2018].
- [26] M. M. Villadiego, Y. O. Roa, and L. Tejada Benítez, "ESTERIFICACIÓN Y TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITES RESIDUALES PARA OBTENER BODIESEL," *Luna Azul*, no. 40, 2015.
- [27] L. M. R. Santamaría and M. Á. Molano, "Transesterificación del aceite de palma con metanol por medio de una catálisis heterogénea empleando un catalizador ácido," *Rev. Ing.*, vol. 0, no. 24, pp. 43–51, May 2006.
- [28] P. Mazo, L. Rios, and G. Restrepo, *Métodos alternativos para la producción de Biodiesel. Microondas y Ultrasonido*, vol. 20, no. 1. 2007.
- [29] E. Sendzikiene, K. Kazancev, and I. Kazanceva, "APPLICATION OF USED FOR FRYING OIL FOR BODIESEL FUEL PRODUCTION," *Ecol. Saf.*, vol. 8, pp. 62–70, 2014.
- [30] C. Systems, "CT Systems | Biodiesel technologies," 2018. [Online]. Available: <http://ctsystems.ua/?lang=es>. [Accessed: 18-Jul-2018].
- [31] E. A. Bulla Pereira, "Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura," Universidad Nacional de colombia, 2014.
- [32] M. Rincón and D. Martínez, "Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria," *Rev. Palmas*, vol. 30, no. 2, pp. 11–24, 2009.
- [33] C. J. Claudia Marcela; Loaiza, Jair Leopoldo; Cortés, *Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD*, vol. 26, no. 3. [Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería], 2006.
- [34] M. G. Baca López and R. Paredes Rosario, "Análisis de factibilidad del cambio de petroleo residual 6 por biodiesel en calderas de vapor saturado de 400 BHP," Medellín, 2011.
- [35] Twenergy, "Biodiésel: ventajas y desventajas - Twenergy," 2012. [Online]. Available: <https://twenergy.com/a/biodiesel-ventajas-y-desventajas-196>. [Accessed: 08-Jun-2019].
- [36] J. César, B. Prisco, J. Esteban, and O. Berrío, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALDERA QUE USA COMO COMBUSTIBLE CÁSCARA DE *JATROPHA CURCA*," 2010.
- [37] E. A. Bulla-Pereira, C. A. Guerrero-Fajardo, and F. E. Sierra-Vargas, "Producción de biodiésel por etanolisis utilizando aceites de fritura de hoteles y su uso en calderas pirotubulares," *Iteckne*, vol. 12, no. 1, pp. 44–53, 2015.
- [38] "Óxidos de Nitrógeno." [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos->

- nitrogeno.aspx. [Accessed: 08-Apr-2020].
- [39] “Necesidades de aire de combustión | Academia Testo.” [Online]. Available: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/necesidades-de-aire-de-combustion>. [Accessed: 10-Apr-2020].
- [40] FAO, “Situación del mercado de biocombustibles,” *Perspect. agrícolas*, 2016.
- [41] T. L. Alleman, R. L. McCormick, E. D. Christensen, G. Fioroni, K. Moriart, and J. Yanowitz, “Biodiesel Handling and Use Guide (Fifth Edition),” 2016.
- [42] M. Hajjari, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, and H. Ghanavati, “A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72. Pergamon, pp. 445–464, 01-May-2017.
- [43] W. B. Association, “GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2019,” pp. 1–58, 2019.
- [44] A. da S. César, D. E. Werderits, G. L. de Oliveira Saraiva, and R. C. da S. Guabiroba, “The potential of waste cooking oil as supply for the Brazilian biodiesel chain,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 246–253, May 2017.
- [45] M. G. Baca López and R. Paredes Rosario, “Análisis de pre factibilidad del cambio de petróleo residual 6 por biodiesel en calderas de vapor saturado de 400 BHP,” *9th Lat. Am. Caribb. Conf. Eng. Technol.*, pp. 1–10, 2011.
- [46] C. C. Leiva Bautista, “La utilización del metanol como biocombustible,” *Reflex. Real. Reflect.*, vol. 31, pp. 9–30, 2011.
- [47] C. A. Cardona Alzate, “Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos latinoamericano y mundial.,” *Rev. Ing.*, no. 29, pp. 109–120, 2009.
- [48] A. Espinoza, S. Bautista, P. C. Narváez, M. Alfaro, and M. Camargo, “Sustainability assessment to support governmental biodiesel policy in Colombia: A system dynamics model,” *J. Clean. Prod.*, vol. 141, pp. 1145–1163, Jan. 2017.
- [49] J. Barón, Manuel; Huertas, Isaac; Orjuela, “Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: una revisión de la literatura,” *INGENIERIA*, vol. 18, no. 1, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, pp. 84–117, 2013.
- [50] N. Plata, Vladimir Plata; Kafarov, Viatcheslav; Moreno, “Desarrollo de una metodología de transesterificación de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas,” *PROSPECTIVA*, vol. 7, no. 2, Universidad Autonoma del Caribe, pp. 35–41, 2009.
- [51] J. A. Posada-Duque and C. A. Cardona-Alzate, “Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiesel,” *Ing. y Univ.*, vol. 14, no. 1, pp. 9–28, 2010.
- [52] G. Knothe, J. Krahl, and J. H. Van Gerpen, *The biodiesel handbook Online resource*. 2010.
- [53] A. Macor and P. Pavanello, “Performance and emissions of biodiesel in a boiler for residential heating,” *Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2025–2032, Dec. 2009.
- [54] A. Ghorbani, B. Bazooyar, A. Shariati, S. M. Jokar, H. Ajami, and A. Naderi, “A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4725–4732, Dec. 2011.
- [55] G. Kilic, B. Sungur, B. Topaloglu, and H. Ozcan, “Experimental analysis on the performance and emissions of diesel/butanol/biodiesel blended fuels in a flame tube boiler,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, pp. 195–202, Feb. 2018.
- [56] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. McGraw Hill, 2006.
- [57] R. Bono Cabré, “Diseños cuasiexperimentales y longitudinales,” in *DISEÑO DE INVESTIGACIÓN*, Universida., 2009, p. 86.

- [58] ICONTEC, “Normas técnicas colombianas,” in *NORMAS*, 2003.
- [59] Google Maps, “No Title.” .
- [60] I.E.E.H.N., “Manual Planta Térmica Didáctica Universidad ECCI,” BOGOTÁ, 2010.
- [61] U. Autónoma De Madrid, “Análisis de Datos 2º de Biología ANOVA unifactorial,” Madrid, 2018.
- [62] D. C. Patiño, O. Fernando, and B. Delgado, “Comparación de emisiones de ACPM y biodiésel de aceite de atún 1,” Pasto (Nariño), 2018.
- [63] E. A. Bulla-Pereira, C. A. Guerrero-Fajardo, and F. E. Sierra-Vargas, “Producción de biodiésel por etanolisis utilizando aceites de fritura de hoteles y su uso en calderas pirotubulares,” *ITECKNE*, vol. 12, no. 1, 2015.
- [64] J. Laverde-Múnera, P. N. Alvarado-Torres, W. Ruiz-Machado, and C. Químicas, “Cinética de la oxidación de un carbonizado de carbón Efecto del contenido de oxígeno y metano en la cinética de oxidación de un carbonizado de carbón Artículo original,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, vol. 41, no. 159, pp. 221–229, 2017.
- [65] A. Ghorbani, B. Bazooyar, A. Shariati, S. M. Jokar, H. Ajami, and A. Naderi, “A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4725–4732, 2011.
- [66] repsol, “Ficha técnica Diesel.” .
- [67] “Revista ElectroIndustria - Control y eficiencia de Combustión en Calderas.” [Online]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1135>. [Accessed: 25-Sep-2020].



## ANEXOS

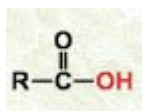
### ANEXO 1. BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO

Inicialmente se calcula el peso molecular promedio del triglicérido, para lo cual se emplea el valor del perfil lipídico del aceite obtenido por cromatografía de gases.

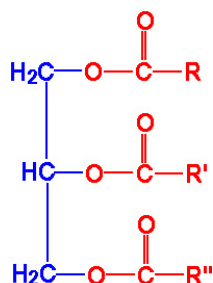
El perfil lipídico nos da el porcentaje en peso del contenido de ácidos grasos presentes en el aceite vegetal.

Con el porcentaje de cada ácido graso presente en el aceite y su respectivo peso molecular se determinan el peso molecular promedio de los ácidos grasos presentes en el aceite que para el presente caso fue de 271,11 g/mol.

La estructura general de un ácido graso es la siguiente:



Se puede observar que si le quitamos un hidrogeno a la estructura anterior el grupo resultante se obtiene la estructura que se encuentra repetida 3 veces en el triglicérido ( color rojo)



Por lo anterior le quitamos el peso molecular de un hidrogeno al peso molecular promedio obtenido del contenido de ácidos grasos en el aceite y le sumamos el peso molecular restante de los átomos de carbono de hidrogeno (color azul) presentes en el triglicérido para de esta forma obtener el peso molecular promedio del triglicérido.

$$\overline{PM} = 271,11 - 1 = 270,11 \text{ g/ml}$$

#### PESO MOLECULAR PROMEDIO DEL ACEITE VEGETAL:

$$(3 \times 270,11) + 41 = 854,33 \text{ g/ml}$$

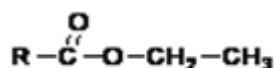
### CANTIDAD EN LITROS DE ETANOL DE EXCESO USADO EN LA REACCION

$$25Kg \text{ A. palm} \times \frac{1Kmol \text{ A. palm}}{854,33 \text{ Kg A. palm}} \times \frac{9Kmol \text{ Etanol}}{1Kmol \text{ A. palm}} \times \frac{46 \text{ Kg}}{1Kmol \text{ etanol}} \times \frac{ml}{0,79g} \\ \times \frac{1000g}{1Kg} \times \frac{1 \text{ litro}}{1000m} = 15,1 \text{ litros de etanol.}$$

**NOTA:** Se utiliza exceso de alcohol de acuerdo al Diseño experimental del proceso de obtención de biodiésel a nivel laboratorio, este exceso de alcohol luego de la transesterificación de recupera en el condensador de tubo y coraza de la planta pilto

### CALCULO DEL PESO MOLECULAR PROMEDIO DEL BODIESEL

Como se puede observar el biodiesel corresponde en este caso a esteres etílicos que tienen la siguiente estructura:



De forma similar que el cálculo del peso molecular del aceite, para el caso del peso molecular del éster se parte del peso molecular de los ácidos grasos, a los que se le resta el valor del peso molecular del hidrogeno y se suma el peso molecular de los átomos de carbono e hidrogeno que se transfirieron por reacción con el etanol ( 29g/mol)

$$\overline{PM}_{biodiesel} = \frac{270,11g}{mol} + 29g/mol = 295,11 \text{ g/ml}$$

Este peso molecular se usa posteriormente para el cálculo de la cantidad teórica de biodiesel que se esperarí obtener

### CANTIDAD TEORICA DE BODIESEL

$$25Kg \text{ A. palm} \times \frac{1Kmol \text{ A. palm}}{854,33 \text{ Kg A. palm}} \times \frac{3Kmol \text{ Biodiesel}}{1Kmol \text{ A. palm}} \times \frac{295,11 \text{ Kg Biodiesel}}{1Kmol \text{ Biodiesel}} \\ = 26,25 \text{ Kg biodiesel}$$

### CANTIDAD TEORICA DE GLICERINA

$$25Kg \text{ A. palm} \times \frac{1Kmol \text{ A. palm}}{854,33 \text{ Kg A. palm}} \times \frac{1Kmol \text{ GLICEROL}}{1Kmol \text{ A. palm}} \times \frac{92 \text{ Kg Glicerol}}{1Kmol \text{ Glicerol}} = \\ = 2,69 \text{ Kg Glicerina}$$

## ANEXO 2. DATOS EXPERIMENTALES

### DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DEL CONSUMO DE BIODIÉSEL

Tabla 24. Consumo de biodiésel por mezcla

MEDICION	CONSUMO POR MEZCLA (t = 60 s)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	3,061	3,19	3,75	3,06	3,03	2,80	2,83
2	3,093	3,26	3,80	3,13	3,06	2,97	2,94
3	3	3,19	3,90	3,19	3,00	2,86	2,78
4	3,061	3,16	3,90	3,16	2,97	2,91	2,86
5	3,03	3,13	3,80	3,09	3,06	2,91	2,68
Promedio	3,05	3,19	3,83	3,13	3,02	2,89	2,82
Desviación	0,035	0,050	0,066	0,051	0,040	0,063	0,097

[autores]

Figure 1: One-way ANOVA

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	98.2032	3	32.7344	31711.46	4.05064e-54
Error	0.032	31	0.001		
Total	98.2352	34			

Figura 44. Análisis ANOVA del Consumo de biodiésel por mezcla. [autores]

### DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DE EMISIONES DE O<sub>2</sub>

Tabla 25. Emisiones de O<sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel

MEDICIÓN	EMISIONES O <sub>2</sub> (%)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	5,2	3,5	4,2	3,7	3,6	5	4
2	5,1	3,4	4,2	3,7	3,8	5,1	4,2
3	5,4	3,2	3,8	3,6	4	4,9	4,1
4	5,7	3,3	4	3,8	4,4	5	4,3
5	5,3	3,4	4,2	3,8	4,2	5,1	4,2
Promedio	5,34	3,36	4,08	3,72	4	5,02	4,16
Desviación	0,230	0,114	0,179	0,084	0,316	0,084	0,114

Fuente: [autores]

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	14.764	6	2.46067	76.55	4.59273e-16
Error	0.9	28	0.03214		
Total	15.664	34			

Figura 45. Análisis ANOVA de emisiones de O<sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel [autores]

## DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

Tabla 26. Emisiones de CO<sub>2</sub> (%) por mezcla de biodiésel.

MEDICIÓN	EMISIÓN DE CO <sub>2</sub> % (v/v)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	11,8	13	12,4	12,8	12,9	11,8	12,6
2	11,9	13,1	12,4	12,8	12,7	11,8	12,5
3	14	12,9	12,3	12,9	12,6	11,7	12,7
4	12,2	13	12,2	12,7	12,4	11,8	12,5
5	12	13,2	12,4	12,7	12,7	11,9	12,6
Promedio	12,38	13,04	12,34	12,78	12,66	11,80	12,58
Desviación	0,9176	0,1140	0,0894	0,0837	0,1817	0,0707	0,0837

Fuente: [autores]

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	4.65543	6	0.7759	5.94	0.0004
Error	3.66	28	0.13071		
Total	8.31543	34			

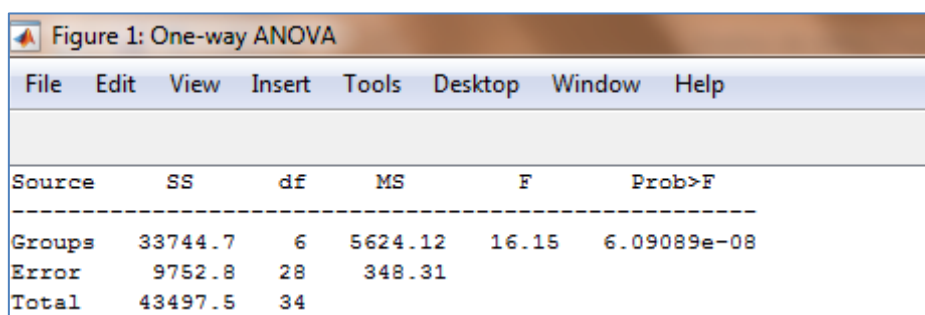
Figura 46. Análisis ANOVA de emisiones de CO<sub>2</sub> (%) de las mezclas de biodiésel [autores]

## DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DE EMISIONES DE CO

Tabla 27. Emisiones de CO (ppm) por mezcla de biodiésel

MEDICIÓN	EMISIÓN DE CO (ppm)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	24	27	17	21	119	6	40
2	32	25	13	16	159	6	26
3	38	26	16	17	146	8	32
4	34	28	18	18	57	10	35
5	27	27	14	19	56	7	30
Promedio	31,00	26,60	15,60	18,20	107,40	7,40	32,60
Desviación	5,5678	1,1402	2,0736	1,9235	48,6549	1,6733	5,2726

Fuente: [autores]



Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	33744.7	6	5624.12	16.15	6.09089e-08
Error	9752.8	28	348.31		
Total	43497.5	34			

Figura 47. Análisis ANOVA de emisiones de CO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]

## DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DE EMISIONES DE NO

Tabla 28. Emisiones de NO (ppm) por mezcla de biodiésel

MEDICIÓN	EMISIÓN DE NO (ppm)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	53	55	52	53	49	41	44
2	55	56	54	54	41	42	45
3	54	54	51	55	42	43	42
4	56	56	56	55	43	41	43
5	60	55	51	53	43	44	45
Promedio	55,60	55,20	52,80	54,00	43,60	42,20	43,80
Desviación	2,7019	0,8367	2,1679	1,0000	3,1305	1,3038	1,3038

Fuente: [autores]

Figure 1: One-way ANOVA					
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	1106.8	6	184.467	48	1.8558e-13
Error	107.6	28	3.843		
Total	1214.4	34			

Figura 48. Análisis ANOVA de emisiones de NO (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]

## DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DE EMISIONES DE NOx

Tabla 29. Emisiones de NOx (ppm) por mezcla de biodiésel

MEDICIÓN	EMISIÓN DE NOX(ppm)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	56	57	54	55	51	43	46
2	57	59	57	57	43	44	47
3	57	56	54	57	44	45	44
4	59	58	58	56	46	44	45
5	63	57	54	57	46	46	47
Promedio	58,40	57,40	55,40	56,40	46,00	44,40	45,80
Desviación	2,7928	1,1402	1,9494	0,8944	3,0822	1,1402	1,3038

Fuente: [autores]

Figure 1: One-way ANOVA					
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	1166.17	6	194.362	51.93	6.86741e-14
Error	104.8	28	3.743		
Total	1270.97	34			

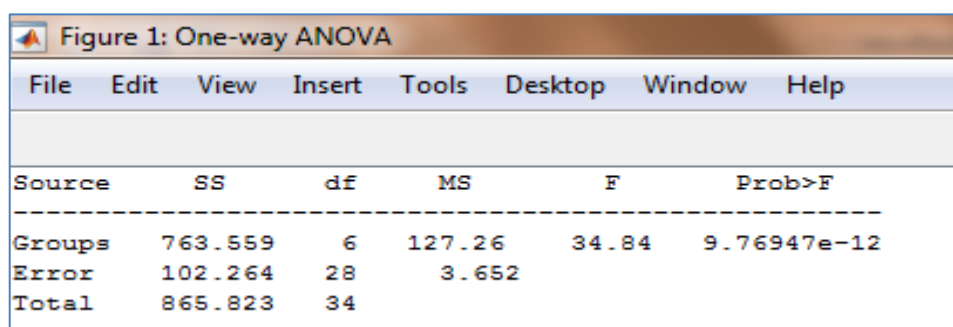
Figura 49. Análisis ANOVA de emisiones de NOx (ppm) de las mezclas de biodiésel [autores]

## DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DE AIRE REQUERIDO PARA LA COMBUSTIÓN

Tabla 30. Cantidad de aire requerido para la combustión (XS) del biodiésel

MEDICIÓN	MEZCLA DE AIRE REQUERIDO XS (%)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	32,4	20	25,4	21,5	20,5	31,7	23,7
2	32,4	19,4	25,3	21,7	22,4	32,5	34,9
3	34,3	21,3	25	21,1	23,6	31,9	28,7
4	32,9	20,5	24,9	21,3	26,3	32,3	27,4
5	33,4	22	25,2	21,4	25,8	32,4	31,5
Promedio	33,08	20,64	25,16	21,40	23,72	32,16	29,24
Desviación	0,7981	1,0310	0,2074	0,2236	2,4035	0,3435	4,2282

Fuente: [autores]



Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	763.559	6	127.26	34.84	9.76947e-12
Error	102.264	28	3.652		
Total	865.823	34			

Figura 50. Análisis ANOVA de aire requerido para la combustión (XS) del biodiésel [autores]

## DATOS EXPERIMENTALES Y ANOVA DE TEMPERATURA DE EMISIÓN DE GASES

Tabla 31. Temperatura de salida de gases T (°C) por mezcla de biodiésel

MEDICIÓN	TEMPERATURA DE SALIDA GASES T (°C)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	326	356	346	342	362	312	348
2	323	364	352	350	354	341	357
3	342	360	356	356	358	320	350
4	350	362	354	360	363	345	349
5	348	358	354	358	360	323	352
Promedio	337,80	360,00	352,40	353,20	359,40	328,20	351,20
Desviación	12,5379	3,1623	3,8471	7,2938	3,5777	14,1669	3,5637

Fuente: [autores]

Figure 1: One-way ANOVA

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Groups	4105.94	6	684.324	10.38	4.61135e-06
Error	1845.6	28	65.914		
Total	5951.54	34			

Figura 51. Análisis ANOVA temperatura de emisión de gases de mezclas de biodiésel [autores]



## **ANEXO 3. PRACTICA EN LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ACIDO. NORMA: ASTM 664-07**

### **1. RESUMEN DE LA TÉCNICA**

La práctica mide el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en 1 gr de muestra. El índice de acidez se expresa en miligramos por gramo.

### **2. MATERIALES**

- Potenciómetro
- Balanza analítica de precisión de 0.1 mg
- Embudo de vidrio para llenado de la bureta
- Pipeta de 10 ml
- Pera de succión
- Agitador magnético
- 1 Erlenmeyer de 250 ml
- 1 Beaker de 250 ml
- 1 Beaker de 100 ml
- Indicador de fenolftaleína
- Plancha de calentamiento con agitación magnética
- Acetona 500 ml
- Solución de hidróxido de potasio 0.1 M
- Solvente de titulación

### **3. PROCEDIMIENTO**

Se toma una muestra según el porcentaje esperado de acides de acuerdo a la tabla 1, y se disuelve en 125 ml de solvente de titulación previamente neutralizado, con la solución de hidróxido de potasio. Adicionar 3 o 4 gotas de fenolftaleína como indicador.

Al tiempo se agita la solución y se titula con la solución de hidróxido de potasio hasta el punto final.

Si la solución se enturbia durante la titulación se agrega una cantidad suficiente del solvente mezclado para obtener una solución transparente.

TABLA 1. Masa de la porción de ensayo

Porcentaje de acidez esperado	Masa de la porción de ensayo g	Concentración de la solución de álcali	Precisión en el pesaje
< 1	28,0	0,05	0,0200
1 a 4	7,0	0,10	0,0200
4 a 15	2,5	0,25	0,0100
15 a 75	0,5	0,50	0,0010
> 75	0,1	0,50	0,0002

#### 4. CALCULOS

El índice de acidez es igual a:

$$\text{Índice de acidez} = \frac{56.1 * V * C_1}{m}$$

Donde:

Índice de acidez = mg de KOH / g muestra

V = Volumen en mililitros de solución de hidróxido de potasio gastada

C<sub>1</sub> = Concentración en mol/litro de la solución volumétrica normalizada de hidróxido de potasio

m = Masa en gramos de la muestra

## **ANEXO 4. PRACTICA EN LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS GRASAS Y ACEITES ANIMALES Y VEGETALES Y LÍQUIDOS: NTC 336**

### **1. RESUMEN DE LA TÉCNICA**

La práctica permite medir la masa, a una temperatura específica, de un volumen de grasa o aceite en un picnómetro

### **2. MATERIALES**

- Sistema de calentamiento
- Termómetro que cubra el rango de temperatura relevante
- Balanza analítica con precisión de 0,001 g

### **3. PROCEDIMIENTO**

#### **3.1. Cálculo del volumen del picnómetro a la temperatura de calibración (T ambiente)**

Se calcula el volumen del picnómetro a la temperatura de calibración por la ecuación:

$$V_d = V_c * [\gamma (\theta_d - \theta_c)]$$

Donde:

$V_d$  = volumen del picnómetro a la temperatura esperada  $\theta_d$ , en mililitros

$V_c$  = volumen del picnómetro a la temperatura de calibración  $\theta_c$ , en mililitros

$\theta_d$  = Temperatura a la cual se desea conocer el volumen del picnómetro (°C)

$\theta_c$  = Temperatura a la cual el picnómetro fue calibrado (°C)

$\gamma$  = Coeficiente medio de expansión cúbica del picnómetro de vidrio, en grados Celsius a la potencia menos uno (0.00001/°C)

### 3.2. Cálculo del volumen del picnómetro a la temperatura requerida (T esperada)

Se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_d = V_c * [1 + \gamma (\theta_d - \theta_c)]$$

Donde:

$V_d$  = volumen del picnómetro a la temperatura esperada  $\theta_d$ , en mililitros

$V_c$  = volumen del picnómetro a la temperatura de calibración  $\theta_c$ , en mililitros

$\theta_d$  = Temperatura a la cual se desea conocer el volumen del picnómetro ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_c$  = Temperatura a la cual el picnómetro fue calibrado ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\gamma$  = Coeficiente medio de expansión cúbica del picnómetro de vidrio, en grados Celsius a la potencia menos uno ( $0.00001/^{\circ}\text{C}$ )

### 3.3 Cálculo de la densidad

La densidad de la muestra  $\rho_{\theta}$  se calcula en gramos por milímetro a la temperatura requerida por la ecuación:

$$\rho_{\theta} = \frac{m_3 - m_1}{V_d} + k (\theta_d - \theta)$$

En donde:

$m_1$  = masa del picnómetro vacío con tapa en gramos

$m_3$  = masa del picnómetro lleno con la muestra y la tapa en gramos

$V_d$  = Volumen del picnómetro a la temperatura  $\theta_d$

$\theta_d$  = temperatura a la cual se efectuó la determinación en  $^{\circ}\text{C}$

$\theta$  = temperatura a la cual se desea conocer la densidad de la muestra en  $^{\circ}\text{C}$

$k$  = Cambio en el medio de la densidad de la muestra debido al cambio de temperatura en gramos/ $\text{ml}^{\circ}\text{C}$  ( $0.00068 \text{ g/ml}^{\circ}\text{C}$ )

**Tabla 1. Densidad (masa por volumen convencional) del agua a la temperatura entre 15°C y 65°C**

<b>Temperatura q</b>	<b>Densidad rw</b>	<b>Temperatura q</b>	<b>Densidad rw</b>	<b>Temperatura q</b>	<b>Densidad rw</b>
<b>°C</b>	<b>g/ml</b>	<b>°C</b>	<b>g/ml</b>	<b>°C</b>	<b>g/ml</b>
15	0,998 05	35	0,992 99	55	0,984 65
16	0,997 89	36	0,992 64	56	0,984 16
17	0,997 72	37	0,992 28	57	0,983 67
18	0,997 54	38	0,991 92	58	0,983 17
19	0,997 35	39	0,991 55	59	0,982 67
20	0,997 15	40	0,991 17	60	0,982 17
21	0,996 94	41	0,990 79	61	0,981 65
22	0,996 72	42	0,990 39	62	0,981 13
23	0,996 49	43	0,989 99	63	0,980 60
24	0,996 24	44	0,989 58	64	0,980 06
25	0,995 99	45	0,989 17	65	0,979 52
26	0,995 73	46	0,988 74		
27	0,995 46	47	0,988 32		
28	0,995 18	48	0,987 88		
29	0,994 90	49	0,987 44		
30	0,994 60	50	0,986 99		
31	0,994 29	51	0,986 54		
32	0,994 98	52	0,986 07		
33	0,994 65	53	0,985 61		
34	0,994 32	54	0,985 13		

## **ANEXO 5. PRACTICA DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACION DEL PUNTO DE FLAMA. NORMA: ASTM D 93-07**

### **1. RESUMEN DE LA TECNICA**

La prueba de punto de flama es un método dinámico que depende de las velocidades específicas de calentamiento y su exactitud de medida.

Se llena del recipiente del equipo hasta la marca establecida en el mismo en el cual se cubre con una tapa de dimensiones específicas. La muestra contenida en el recipiente se calienta a una velocidad de agitación específica. La continuación se expone la muestra dentro del recipiente a una fuente de ignición a intervalos regulares con interrupciones simultáneas de agitación hasta que se presente una flama y se reporta la lectura del termómetro como el valor del punto de flama.

### **2. MATERIALES Y REACTIVOS**

Para la realización de la práctica de obtención de punto de flama, se requieren los siguientes equipos de laboratorio:

- Probeta de 100 ml
- Termómetro de 0 a 200°C según especificaciones del equipo de punto de flama
- Suministro de gas natural
- Equipo para punto de flama de copa cerrada

### **3. A. Rampa de calentamiento**

Si la copa presenta suciedad o residuos lave con un solvente apropiado (acetona), seque las paredes internas y deje evaporar la acetona que pueda estar presente.

Asegúrese que la muestra llene la copa del equipo hasta la línea especificada en el recipiente.

La temperatura de la copa debe estar al menos 18°C por debajo de la temperatura de punto de flama esperada. Si se adiciona demasiada muestra en la copa remuévala con una pipeta o retire completamente el fluido.

Ensamble la copa de prueba dentro del equipo. Asegúrese que la tapa de cierre este correctamente sujeta a la copa e inserte el termómetro en el orificio dispuesto para tal fin en el equipo. Encienda la llama del quemador y ajuste a un diámetro 3.2 a 4.8 mm (la presión del gas no debe exceder los 3 KPa (12 pulgadas) de presión de agua.

Se debe tener especial precaución en el manejo de la flama puesto que si esta se extingue el gas del quemador puede ingresar a la cámara y dar una lectura anormal del punto de flama.

Aplique el calor a una velocidad tal que la temperatura indicada por el termómetro mantenga un incremento de entre 5 a 6°C/min (9 a 11°F/min).

Aplique la agitación manteniendo una velocidad de entre 90 a 120 rpm. (precauciones – se debe tener especial precaución en todos los detalles relacionados con la fuente de ignición, velocidad de incremento de la temperatura y velocidad de exposición de la fuente de ignición al vapor para poder obtener unos buenos resultados de la prueba)

#### b. Aplicación de la fuente de ignición.

Si se espera que la muestra tenga un punto de flama de 110°C o 230°F o menor, aplique la fuente de ignición cuando la temperatura de la muestra este a 23 más o menos 5°C por debajo del punto de flama esperado y cada vez de ahí en adelante en lecturas de temperatura que sean múltiplos de 1°C. Interrumpa la agitación de la muestra y aplique la ignición exponiendo la muestra a esta fuente por espacio de 1 segundo y rápidamente eleve la posición del quemador hasta su posición inicial.

Si se espera que la muestra tenga un punto de flama por encima de los 110°C, aplique la fuente de ignición a incrementos de 2°C, iniciando a una temperatura de 23 más o menos 5°C por debajo de punto de flama esperado. Registre la temperatura de punto de flama cuando aparezca un destello azulado a lo largo de toda la superficie de la muestra la cual se propaga instantáneamente en el interior de la copa.

Cuando este destello azulado aparezca al inicio de la prueba, no se debe considerar como el valor del punto de flama y se debe ignorar y se debe repetir la prueba con otra muestra nueva.

Cuando se detecta un punto de flama a una temperatura mayor de los 28°C por encima de la primera aplicación de la fuente de ignición o cuando el punto de flama se detecta a una temperatura la cual es menor de 18°C por encima de la primera aplicación de la fuente de ignición el resultado se debe considerar como aproximado y la prueba se debe repetir con una muestra nueva. Y esta nueva muestra se debe someter a la fuente de ignición a unos 23°C más o menos 5°C por debajo de la temperatura a la cual se encontró del dato aproximado anteriormente.

Cuando el equipo se ha enfriado hasta un manejo seguro, esto es menos de 55°C remueva la cubierta y la copa y limpie el equipo.

#### c. Cálculos

observe y registre el valor del punto de flama, así como la presión barométrica en el momento de la prueba. Cuando la presión difiere de 101.3 KPa (760mm Hg) corrija el punto de flama como sigue:

$$\text{Punto de flama corregido (}^\circ\text{C)} = C + 0.033 (760 - P)$$

Donde:

C= Punto de flama observado °C

P= Presión barométrica en mm Hg

## **ANEXO 6. PRACTICA DE LABORATORIO DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD CINEMATICA A 40°C. NORMA: ASTM D445-06**

### **1. RESUMEN DE LA TECNICA**

La prueba especifica el procedimiento para medir la viscosidad cinemática,  $\gamma$  de un combustible, tanto transparente como opaco, por la medida del tiempo de un volumen de líquido que fluye bajo la acción de la gravedad a través de un viscosímetro calibrado de vidrio.

La viscosidad dinámica  $\mu$  se puede obtener al multiplicar la viscosidad cinemática por la densidad de fluido.

### **2. MATERIALES Y REACTIVOS**

Para la realización de la práctica de obtención de viscosidad cinemática, se requieren los siguientes equipos de laboratorio:

- Baker de 100 ml
- Viscosímetro Cannon Fenske
- Pera de succión
- Cronometro
- Baño termostato
- Termómetro de vidrio

Para la realización de la práctica se requieren las siguientes materiales y reactivos:

- Biodiésel
- Acetona grado técnico (para lavado)

### **3. PROCEDIMIENTO**

Limpie el viscosímetro usando solventes adecuados, pasando aire seco a través del instrumento para remover las trazas del solvente.

Si hay posibilidad de encontrar material sólido como polvo u otro tipo de material particulado en la muestra esta se debe filtrar a través de un filtro de vidrio sinterizado o un filtro de papel.

Para cargar la muestra dentro del viscosímetro, invierta el instrumento y aplique succión al tubo L, sumerja el tubo N en la muestra líquida y retire el líquido hasta la marca F, seque el brazo N y retorne el viscosímetro a su posición vertical normal.

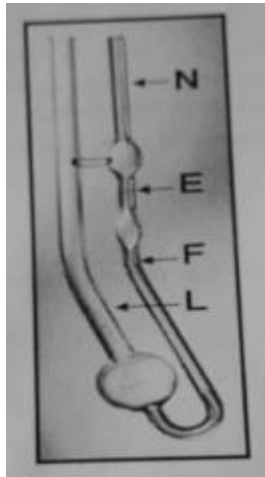
Lleve el viscosímetro dentro del receptáculo en el equipo e insértelo en el baño a una temperatura constante. Alinee el viscosímetro verticalmente dentro del baño.

Permita que la muestra alcance la temperatura de 40°C y manténgala por espacio de 10 minutos.

Aplique succión al tubo N y remueva el líquido ligeramente por encima de la marca E.

Para medir el tiempo de flujo permita que el líquido fluya libremente hasta pasar la marca F, midiendo el tiempo que dura en pasar desde la marca E hasta la marca F.





a. Cálculos

Calcule la viscosidad cinemática como el promedio de las lecturas obtenidas

$$\text{Viscosidad cinemática } \gamma = C \times t$$

Donde:

C= constante del viscosímetro en  $mm^2 / s^2$  (constante del viscosímetro a  $40^\circ C = 0,008308 mm^2 / s^2$ ) (cSt/s)

t= tiempo en segundos de la lectura

Tiempo (s)	Viscosidad cinemática ( $mm^2 / s^2$ )
t1	
t2	
t3	

La viscosidad dinámica o absoluta se puede determinar por:

$$\mu \text{ (mPa.s)} = \gamma \times \rho \times 10^{-3}$$

Donde:

$\mu$  = Viscosidad dinámica en más



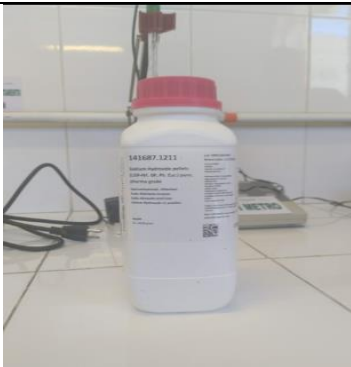
$\gamma$  = Viscosidad cinemática en ( $mm^2 / s$ )





$\rho$  = Densidad en  $kg/m^3$  del fluido a la misma temperatura empleada para medir la viscosidad cinemática.




BIBLIOGRAFIA




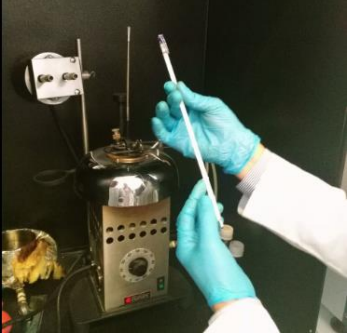
1. Norma ASTM D 445 – 06

ANEXO 7. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A ESCALA LABORATORIO




ITEM	ACTIVIDAD	EVIDENCIA FOTOGRAFICA
1	Medición del aceite de palma: 250 ml	
2	Calentamiento a 110°C por espacio de 5 minutos	
3	Pesaje del catalizador KOH	




4	Medición y adición del etanol	
5	Adición del catalizador y agitación magnética, hasta disolver completamente	
6	Se llevo la mezcla a un reactor de vidrio de cuatro bocas, por un periodo de 90 minutos para su reacción.	
7	Decantación: se trasladó la mezcla a un embudo de decantación y se dejó reposar por un periodo de 24 horas.	

<p>8</p>	<p>Medición de la viscosidad a 40°C Para medir el tiempo de flujo permita que el líquido fluya libremente hasta pasar la marca F, midiendo el tiempo que dura en pasar desde la marca E hasta la marca F.</p>	 
<p>9</p>	<p>Determinación del número ácido, se pesa en la balanza analítica y se agita la solución, hasta que se torne transparente</p>	 

		
10	<p>Determinación del punto de flama.          Se llena del recipiente del equipo hasta la marca establecida en el mismo en el cual se cubre con una tapa de dimensiones específicas. La muestra contenida en el recipiente se calienta a una velocidad de agitación específica.          A continuación se expone la muestra dentro del recipiente a una fuente de ignición a intervalos regulares con interrupciones simultaneas de agitación hasta que se presente una flama y se reporta la lectura del termómetro como el valor del punto de flama.</p>	  

## ANEXO 8. CORRIDA DE BIODIÉSEL EN PLANTA PILOTO

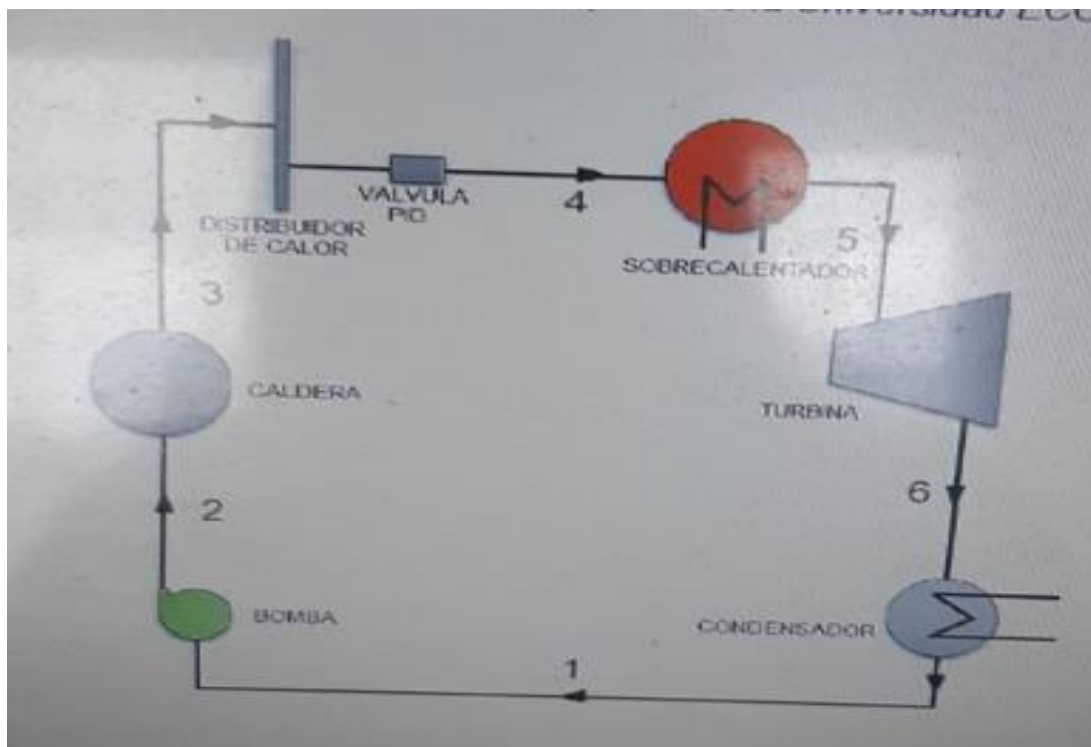
ITEM	ACTIVIDAD	EVIDENCIA FOTOGRAFICA
1	<p>Se cargaron 25 kg de ARP, a la planta piloto, la cual se calentó hasta una temperatura de 65°C para fundir el ARP. disolver la solución de hidróxido de potasio y etanol.</p>	
2	<p>Posteriormente se disolvió la solución de hidróxido de potasio y etanol, de acuerdo al mayor rendimiento obtenido en la etapa experimental</p>	
3	<p>La reacción de transesterificación se llevó a cabo durante 1.5 horas.</p>	

4	Retiro del alcohol en exceso por medio de decantación.	
5	El biodiésel lavado se evapora a una temperatura de 110°C por espacio de 10 min, para remover trazas de agua del proceso de lavado.	
6	Finalmente se filtro el biodiésel con una bolsa de poro 0.5 μm, y se empaco en pampinas de 5 galones para aplicar como combustible a la planta térmica de la universidad ECCI y realizar las pruebas respectivas.	

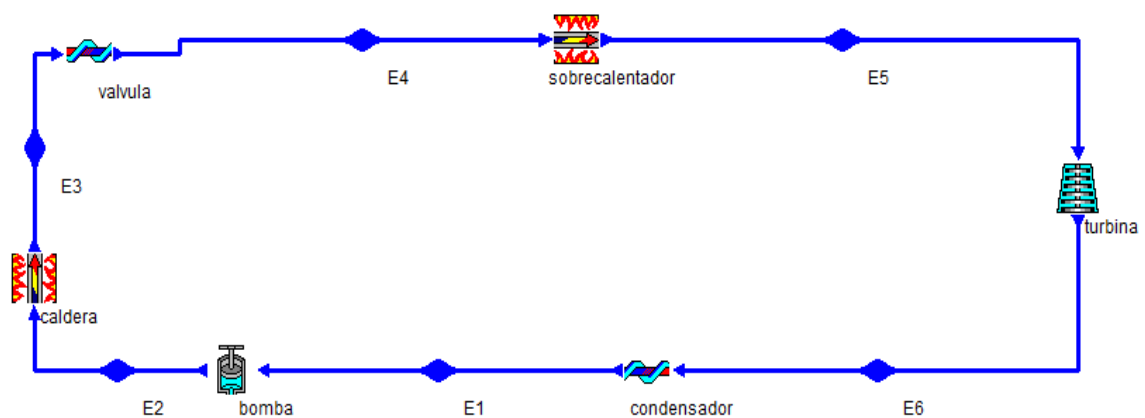
## ANEXO 9. CICLO DE VAPOR DE LA PLANTA TÉRMICA UNIVERSIDAD ECCI, CÁLCULOS DE EFICIENCIA DE LA PLANTA TÉRMICO Y RELACIÓN DE POTENCIAS

Se representa el ciclo de vapor con ayuda del programa Cyclepad, en donde se simula el comportamiento de la planta, teniendo en cuenta que el calor aportado ( $Q_s$ ) fue proporcionado por acción del biocombustible.

Como se menciona en este documento, la planta térmica de la Universidad ECCI, consta de una caldera, un distribuidor de vapor, una válvula PID, un sobre calentador, una turbina, un condensador y una bomba. A continuación, se adjunta el ciclo de la planta, y el ciclo representado en el problema



Fuente: Autores del proyecto



Fuente: Programa de simulación de ciclos de vapor Cycle pad.



Cabe aclarar que para poder simular el ciclo e en el programa, se reemplaza el distribuidor y la válvula PID por un solo componente (válvula), y así introducir la caída de presión y temperatura entre los puntos E3 y E4.

A continuación, se asignan los valores que se leyeron experimentalmente en cada uno de los estados del ciclo.

<b>DATOS PROPIOS</b>		
ESTADO 1:	SALIDA CONDENSADOR	
	PRESION (Kpa)	TEMPERATURA (°C)
CONDENSADOR	68,94	43
ESTADO 2:	SALIDA BOMBA	
	PRESION (Kpa)	TEMPERATURA (°C)
BOMBA	689,5	43
ESTADO 3:	SALIDA CALDERA	
	PRESION (Kpa)	TEMPERATURA (°C)
CALDERA	689,5	170
ESTADO 4:	MEDIDA EN ACCESORIOS	
	PRESION (Kpa)	TEMPERATURA (°C)
ACCESORIOS	364,7	121,5
ESTADO 5:	SALIDA SOBRECALENTADOR	
	PRESION (Kpa)	TEMPERATURA (°C)
ACCESORIOS	310,264	140
ESTADO 6:	SALIDA TURBINA	
	PRESION (Kpa)	TEMPERATURA (°C)
TURBINA	68,94	118
DATOS ADICIONALES		
	PRESION (Kpa)	TEMPERATURA (°C)
Distribuidor (in)	95	170
Distribuidor (out)	85	160
Tank condensado (in)		32
Tank condensado (out)		40
FLUJO VAPOR (Kg/h)	118	

Fuente: Autores del proyecto

## ASIGNACIÓN DE DATOS AL PROGRAMA PARA CÁLCULO DE ESTADOS TERMODINÁMICOS

Window	Substance	Phase	T (°C)	P (kPa)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	m-dot (kg/s)	T-sat (°C)	P-sat (kPa)	v-f (Tsat) (m³/kg)	v-g (Tsat) (m³/kg)	u-f (Tsat) (kJ/kg)	u-g (Tsat) (kJ/kg)	h-f (Tsat) (kJ/kg)	h-g (Tsat) (kJ/kg)	s-f (Tsat) (kJ/kgK)	s-g (Tsat) (kJ/kgK)	V-dot (m³/sec)	U-dot (kW)	H-dot (kW)	S-dot (kW/K)	flow fraction
E1	WATER	LIQUID	43.00	68.94	0.0010	180.0	180.1	0.6120	0.0378	89.54	8.65	0.0010	2.40	374.9	2,494	375.0	2,659	1.19	7.48	0	6.81	6.81	0.0231	1.0000
E2	WATER	LIQUID	43.00	689.5	0.0010	180.0	180.6	0.6118	0.0378	164.4	8.65	0.0011	0.2768	693.4	2,572	694.2	2,763	1.99	6.71	0	6.80	6.83	0.0231	1.0000
E3	WATER	GAS	170.0	689.5	0.2819	2,582	2,776	6.74	0.0378	164.4	791.5	0.0011	0.2768	693.4	2,572	694.2	2,763	1.99	6.71	0.0107	97.61	104.9	0.2549	1.0000

Cuadro 1.

Window	Substance	Phase	T (°C)	P (kPa)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	m-dot (kg/s)	T-sat (°C)	P-sat (kPa)	v-f (Tsat) (m³/kg)	v-g (Tsat) (m³/kg)	u-f (Tsat) (kJ/kg)	u-g (Tsat) (kJ/kg)	h-f (Tsat) (kJ/kg)	h-g (Tsat) (kJ/kg)	s-f (Tsat) (kJ/kgK)	s-g (Tsat) (kJ/kgK)	V-dot (m³/sec)	U-dot (kW)	H-dot (kW)	S-dot (kW/K)	flow fraction
E4	WATER	LIQUID	121.5	364.7	0.0011	511.1	511.4	1.51	0.0378	140.3	208.1	0.0011	0.5045	590.3	2,550	590.7	2,734	1.74	6.93	0	19.32	19.33	0.0570	1.0000
E6	WATER	LIQUID	68.94	118.0	0.0010	288.5	288.6	0.9419	0.0378	104.3	29.79	0.0010	1.45	437.1	2,511	437.3	2,683	1.36	7.30	0	10.91	10.91	0.0356	1.0000
E5	WATER	GAS	140.0	310.3	0.6004	2,554	2,738	7.01	0.0378	134.7	361.2	0.0011	0.5870	566.2	2,545	566.5	2,727	1.68	6.98	0.0227	96.53	103.5	0.2650	1.0000

Cuadro 2.

Las propiedades resaltadas en color verde son los datos independiente o resultado de la lectura de dispositivos, las demás propiedades son dependientes que van a ser utilizadas para el cálculo de la eficiencia del ciclo.

Presentamos a continuación el diagrama T vs S (temperatura versus entropía) con los datos experimentales sin tener en cuenta las isóbaras.

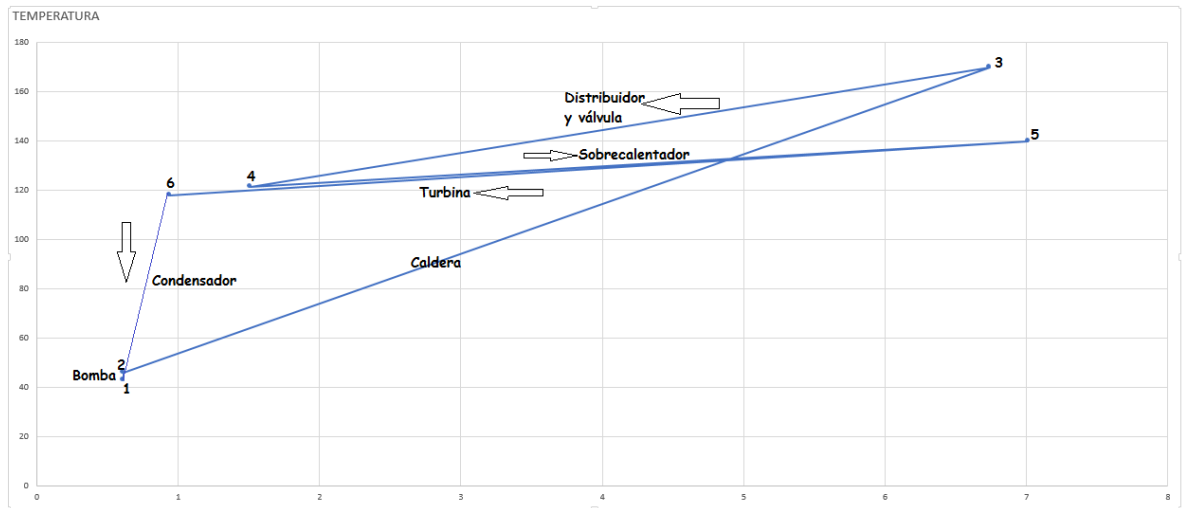
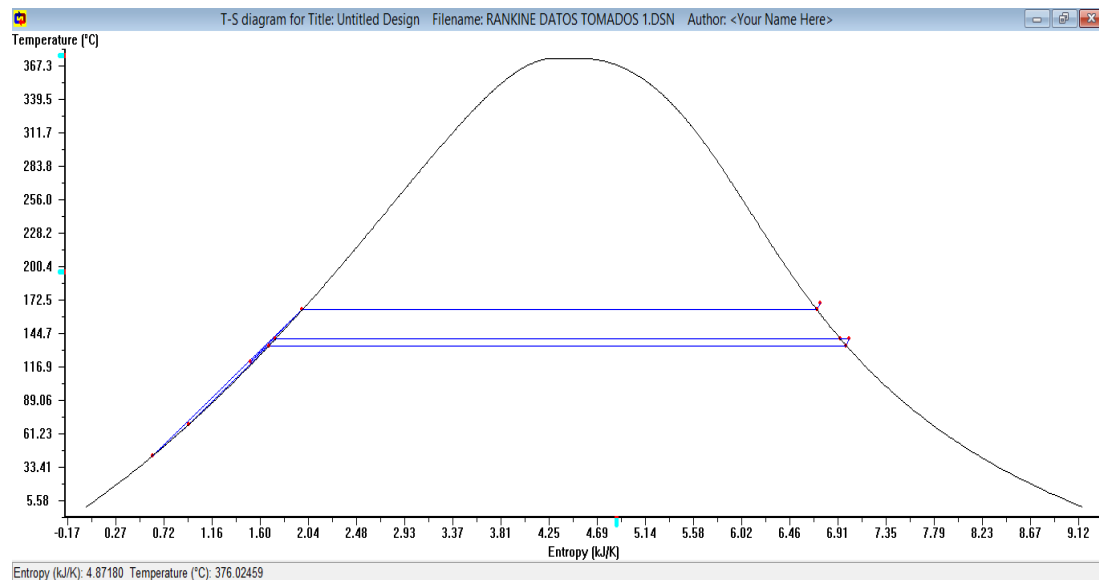


Figura 1.

Ahora el diagrama que imprime el programa con las isóbaras en cuenta.



Es evidente que dadas las circunstancias académicas o pedagógicas y los dispositivos que no están dentro de un ciclo teórico, nuestro ciclo no se asemeja a un Rankine de gran manera, sin embargo podemos realizar el cálculo de acuerdo a la energía consumida por la caldera y el sobrecalentador versus la energía producida por la turbina.

Partimos de la definición de eficiencia del ciclo:

$$\eta = \frac{W_N}{Q_S}$$

Teniendo en cuenta que;

$W_N = \text{Trabajo Neto}$ , y  $Q_S = \text{Calor de entrada}$ , sabemos que  $W_N = W_T - W_B$  siendo  $W_T$ , el trabajo de la turbina y  $W_B$ , trabajo de la bomba.  $Q_S = Q_C + Q_{Sb}$  Donde;  $Q_C = \text{Calor a caldera}$ ,  $Q_{Sb} = \text{Calor a sobrecalentador}$ .

La propiedad termodinámica que permite calcular los trabajos es la entalpía, (h). Por lo cual se establece lo siguiente:

La diferencia entre las entalpías que comprende la turbina (estado 5 y estado 6) del ciclo mostrado en la figura 1 es el trabajo realizado por la turbina, la diferencia entre los estados 2 y 1 es el trabajo consumido por la bomba, la diferencia entre los estados 2 y 3, sumado a la diferencia entre los estados 4 y 5 es el calor aportado al ciclo.

Con lo anterior descrito se puede calcular la eficiencia del ciclo de la siguiente manera:

Tomaremos las propiedades que calculó el programa en cada estado para realizar los cálculos (cuadro 1 y cuadro 2) por lo cual se calcula:

$$\mathcal{W}_N = \mathcal{W}_T - \mathcal{W}_B$$

$$\mathcal{W}_T = h_5 - h_6$$

$$\mathcal{W}_T = 2738 \frac{kJ}{kg} - 288,6 \frac{kJ}{kg}$$

$$\mathcal{W}_T = 2449,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\mathcal{W}_B = h_2 - h_1$$

$$\mathcal{W}_B = 180,6 \frac{kJ}{kg} - 180,1 \frac{kJ}{kg}$$

$$\mathcal{W}_B = -0,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\mathcal{W}_N = 2449,4 \frac{kJ}{kg} - 0,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$\mathcal{W}_N = 2448,9 \frac{kJ}{kg}$$

Calculamos ahora los "Q";

$$Q_S = Q_C + Q_{sb}$$

$$Q_C = h_3 - h_2$$

$$Q_C = 2776 \frac{kJ}{kg} - 180,6 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_C = 2595,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{sb} = h_5 - h_4$$

$$Q_{sb} = 2738 \frac{kJ}{kg} - 511,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{sb} = 2226,6 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_s = 2595,4 \frac{kJ}{kg} + 2226,6 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_s = 4822 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora podemos hallar la eficiencia del ciclo;

$$\eta = \frac{W_N}{Q_s}$$

$$\eta = \frac{2448,9 \frac{kJ}{kg}}{4822 \frac{kJ}{kg}}$$

$$\eta = 50,78\%$$

#### **MEDIDA DE LA EFICIENCIA DE LA PLANTA TÉRMICA PILOTO:**

$$\eta = (\text{h turbina salida} - \text{h turbina entrada}) / \text{h caldera Salida} - \text{h caldera entrada} =$$

$$\eta = 288,6 \text{ Kj / hr} - 2,738 \text{ Kj/hr} / (511,4 \text{ Kj/hr} - 2,776 \text{ Kj/hr})$$

$$= (285,862 \text{ Kj/hr}) - (508,624 \text{ Kj/hr})$$

$$= 0,562 \times 100\% = 56,2\%$$

#### **RAZÓN ENTRE LA POTENCIA DEL COMBUSTIBLE LA POTENCIA ELECTRICA DE LA PLANTA TÉRMICA PILOTO**

R = Potencia eléctrica de la planta térmica / Potencia del combustible

$$R = P_{et} / P_c$$

P<sub>et</sub>: Potencia eléctrica del tablero de bombillos

P<sub>c</sub>: Potencia del combustible

$$P_c = \dot{m}_c / P_{Cic}$$

$\dot{m}_c$  = flujo másico del combustible

P<sub>Cic</sub> = Poder calorífico inferior del combustible

$$\dot{m}_c = \rho_c \times Q_v$$

$\rho_c$  = densidad del combustible

$Q_v$  = Caudal volumétrico del combustible

Datos:

$P_{et} = 600 \text{ J/s}$

$PCIC = 35200 \text{ KJ/kg}$

$\rho_c = 0,875 \text{ kg/ml}$

$Q_v = 3 \text{ gl / min} = 189,271 \text{ ml/s}$

$$\dot{m}_c = \rho_c \times Q_v = 0,875 \text{ kg/ml} \times 189,271 \text{ ml/s} = 165,7 \text{ Kg/s}$$

$$P_c = \dot{m}_c / PCIC = 165,7 \text{ kg/s} / 35200 \text{ KJ/kg} = 0,004 \text{ KJ/s} = 4 \text{ J/s}$$

$$R = P_c / P_{et} = 4 \text{ J/s} / 600 \text{ J/s} * 100\% = 0,66\%$$

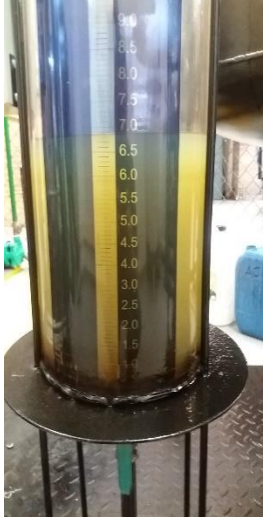


## CONCLUSIONES


El ciclo representado da una idea cercana del comportamiento del ciclo de vapor en condiciones normales de trabajo industrial. Dado el comportamiento de los dispositivos involucrados en el ciclo, no se pueden asumir como isentrópicos, o adiabáticos por lo que se grafican los datos leídos en los dispositivos de medición y se calcula la eficiencia con respecto a las diferencias de entropías netas. Se obtiene una eficiencia del 50,78%, lo que se considera una buena eficiencia para un ciclo de vapor bajo las condiciones en las que se realizó la prueba.

En cuanto al cálculo de la eficiencia térmica de la planta térmica se tomaron en cuenta los saltos entálpicos de la caldera y la turbina y se obtiene una eficiencia del 56.2% que difiere del ciclo termodinámico en un 5,42% lo que significa que el cálculo del ciclo termodinámico se acerca al valor teórico dado por el cálculo realizado.

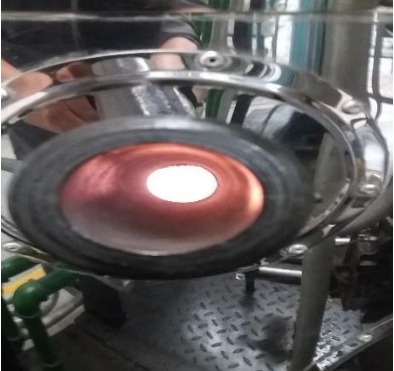
Y finalmente con el cálculo de la razón entre potencias de combustible y potencia eléctrica de la planta eléctrica confirma que no tienen nada que ver y que la primera es independiente de la segunda. Entonces la potencia dada por el combustible a la caldera es independiente de la potencia dada por el vapor a la turbina.

## ANEXO 10. PRUEBAS DE BIODISEL EN PLANTA TÉRMICA PILOTO

ITEM	ACTIVIDAD	EVIDENCIA FOTOGRAFICA
1	Aforo de tanque de combustible de la planta, llenado de tanque con biocombustible con las diferentes mezclas. En la fotografía se observa mezcla B30	
2	Tablero de control y toma de datos para cálculo de ciclo de vapor	
3	Toma de lecturas con analizador de gases. La sonda se colocó a la salida de chimenea.	

4	Control de turbina. Datos para potencia	
5	Toma de datos para cálculo de Potencia eléctrica	
6	Analizador de gases utilizado. Propiedad de la firma MECON S.A.S.	
7	Tablero de potencia eléctrica producida por la turbina	



8	Llama del quemador con mezcla B100	
---	------------------------------------	--

## ANEXO 11. EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

La eficiencia total de combustión se define como la eficacia de cualquier aparato de combustión para convertir la energía interna contenida en un combustible en energía calórica para ser usada en el proceso. Eficiencia de combustión es la energía total contenida por unidad de combustible menos la energía llevada por los gases de combustión y el combustible no quemado [67].

El analizador de gases tiene la capacidad de medir la eficiencia de la combustión y de acuerdo a esto se obtuvieron los siguientes datos:

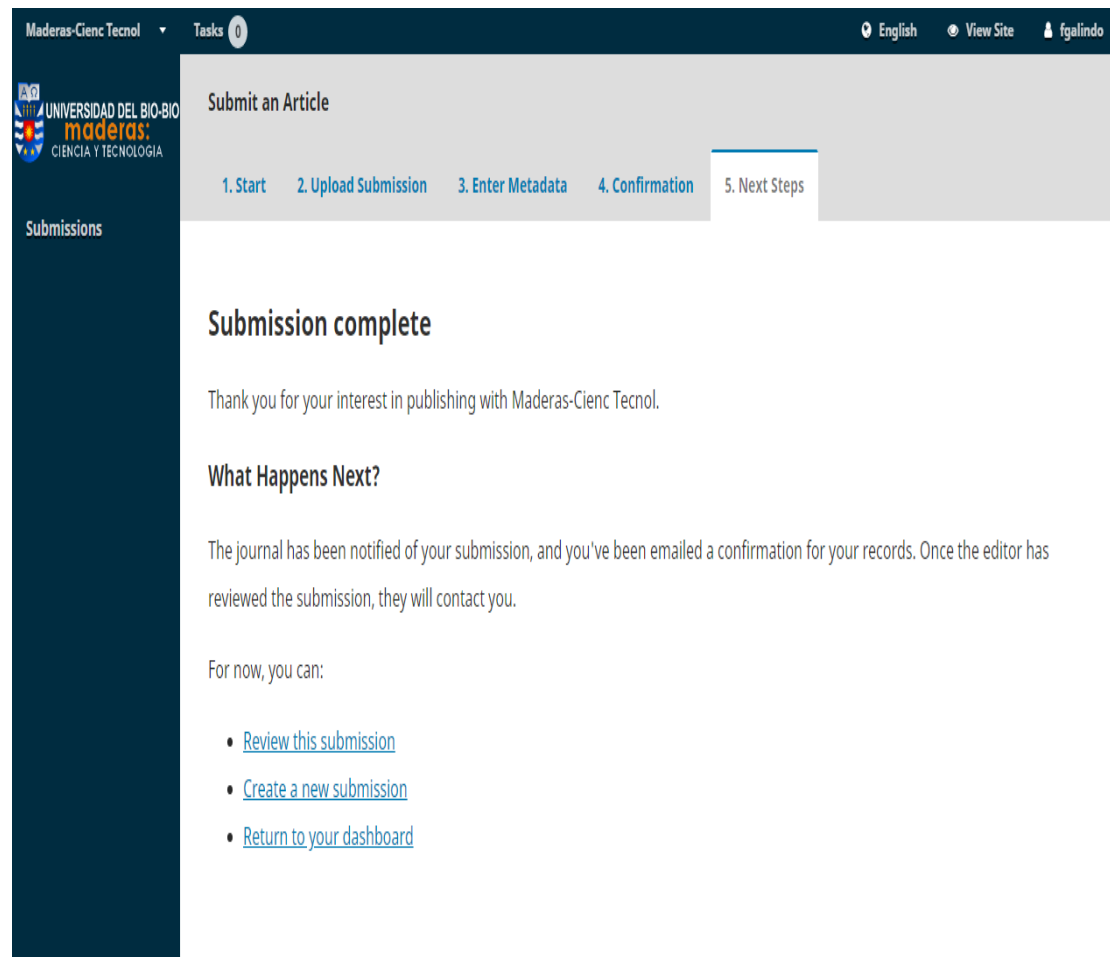
### PRUEBAS DE BIODISEL EN PLANTA TÉRMICA PILOTO UNIVERSIDAD ECCI

MEDICIÓN	EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN (%)						
	B0	B10	B20	B30	B50	B70	B100
1	78,3	79,3	79,2	79,9	79	80,4	78,8
2	77	79	78,9	79,5	78,4	78,9	78,4
3	78,5	79,4	79,1	79,3	78,9	80,1	78,4
4	77,6	79,3	79,5	79,6	79,9	80	80
5	78,2	78,9	79,5	79,7	79,7	80,3	79,8
Promedio	77,92	79,18	79,24	79,60	79,18	79,94	79,08
Desviación	0,6140	0,2168	0,2608	0,2236	0,6140	0,6025	0,7694

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede observar que la eficiencia es muy similar entre todas las mezclas de biodiésel y tan solo un 2% se diferencian con el diésel puro. Por lo que este resultado es irrelevante para el estudio realizado.

## ANEXO 12. ARTÍCULO CIENTÍFICO SOMETIDO

Nuestro artículo ya está sometido en la revista de la universidad chilena Bio-Bio, con una categoría de Q1.



The screenshot shows a web interface for 'Maderas-Cienc Tecnol' at the 'UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO'. The page is titled 'Submit an Article' and features a progress bar with five steps: 1. Start, 2. Upload Submission, 3. Enter Metadata, 4. Confirmation, and 5. Next Steps. The current step is '5. Next Steps', which is highlighted. The main content area displays a 'Submission complete' message, followed by a thank you note, a section titled 'What Happens Next?' explaining the review process, and a list of actions the user can take: 'Review this submission', 'Create a new submission', and 'Return to your dashboard'.

Maderas-Cienc Tecnol Tasks 0 English View Site fgalindo

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO  
maderas.  
CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Submit an Article

1. Start 2. Upload Submission 3. Enter Metadata 4. Confirmation 5. Next Steps

Submissions

### Submission complete

Thank you for your interest in publishing with Maderas-Cienc Tecnol.

#### What Happens Next?

The journal has been notified of your submission, and you've been emailed a confirmation for your records. Once the editor has reviewed the submission, they will contact you.

For now, you can:

- [Review this submission](#)
- [Create a new submission](#)
- [Return to your dashboard](#)