

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE  
BIODIÉSEL A PARTIR DE JATROPHA CURCAS  
Y APLICACIÓN A LOS MOTORES DE  
COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO

Autor: Enrique Gutiérrez Ballesteros

Tutor: Miguel Torres García

Dpto. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE  
BIODIÉSEL A PARTIR DE JATROPHA  
CURCAS Y APLICACIÓN A LOS MOTORES DE  
COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO**

Autor:

Enrique Gutiérrez Ballesteros

Tutor:

Miguel Torres García

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE  
JATROPHA CURCAS Y APLICACIÓN A LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA  
ALTERNATIVO

Autor: Enrique Gutiérrez Ballesteros

Tutor: Miguel Torres García

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*

# Resumen

---

La creciente demanda de energía junto con el agotamiento esperado de los combustibles fósiles han promovido la búsqueda de combustibles alternativos que puedan obtenerse de recursos de energía renovable. El biodiésel como recurso de energía renovable ha llamado la atención de muchos investigadores y científicos debido a su inmenso potencial para ser parte de una combinación de energía sostenible en un futuro próximo.

Este informe intenta recopilar los hallazgos sobre el potencial del biodiésel como fuente de energía renovable, sus características y propiedades, la viabilidad de la *Jatropha curcas* como fuente de biodiésel, así como el impacto del biodiésel de *Jatropha curcas*.

El documento muestra que la *Jatropha curcas* es una de las materias primas más baratas y posee unas propiedades con un mayor contenido de aceite en comparación con otras. Al ser materias primas de semillas oleaginosas no comestibles, no afectará al precio de los alimentos. El biodiésel de *Jatropha* tiene la propiedad de reducir las emisiones de GEI en comparación con el combustible diésel y puede usarse en motores diésel con un rendimiento similar. La producción de biodiésel de la *Jatropha* es ecológica y ofrece muchos beneficios sociales y económicos para la población donde se desarrolle la producción.

La parte final de este informe también describe la aplicación del biodiésel de *Jatropha* en motores diésel.

# Abstract

---

The increasing energy demands along with the expected depletion of fossil fuels have promoted to search for alternative fuels that can be obtained from renewable energy resources. Biodiesel as a renewable energy resource has drawn the attention of many researchers and scientists because its immense potential to be part of a sustainable energy mix in near future.

This report attempts to compile the findings on current global potential of biodiesel as a renewable energy source, his characteristics and properties, practicability of *Jatropha curcas* as a biodiesel source, as well as impact of biodiesel from *Jatropha curcas*.

The paper found that *Jatropha curcas* is one of the cheapest biodiesel feedstock and it possesses some properties with higher oil contents compared to others. Being non edible oil seed feedstocks it will not affect food price. *Jatropha* biodiesel has potential to reduce GHG emission than diesel fuel and it can be used in diesel engine with similar performance of diesel fuel. *Jatropha* is eco-friendly and offers many social and economical benefits for the population where his production take place.

Final part of this report also describes the application of biodiesel from *Jatropha* in diesel engines.

# Objetivos

---

El objetivo principal de este trabajo consiste en el estudio y análisis del biodiésel obtenido a partir de la planta *Jatropha Curcas*, su eficiencia como materia prima con grandes características frente a muchas otras y, también se mostrará en el documento un estudio de la calidad del aceite extraído de la planta, así como sus propiedades y características frente al diésel convencional y las técnicas de conversión del mismo aceite en biodiésel.

Por último, un análisis del comportamiento de este biocombustible en los motores de combustión interna, estudios de prueba del biodiésel obtenido de la *Jatropha* en dichos motores y su efecto en la emisión de gases de efecto invernadero.

# Índice

---

Resumen	v
Abstract	vi
Objetivos	vii
Índice	viii
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
<b>BLOQUE I: BIOCOMBUSTIBLES</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2 GENERACIONES DE BIOCOMBUSTIBLES</b>	<b>1</b>
<b>3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS BIOCOMBUSTIBLES</b>	<b>2</b>
<b>4 TIPOS</b>	<b>3</b>
4.1. <i>BIOETANOL</i>	3
4.2. <i>BIOGÁS</i>	4
4.3. <i>BIODIÉSEL</i>	5
<b>5 MARCO NACIONAL Y EUROPEO</b>	<b>6</b>
<b>BLOQUE II: BIODIÉSEL</b>	<b>8</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
<b>2 VENTAJAS E INCONVENIENTES</b>	<b>8</b>
<b>3 PROPIEDADES DEL BIODIÉSEL</b>	<b>9</b>
<b>4 MATERIAS PRIMAS</b>	<b>11</b>
4.1. <i>ACEITES VEGETALES CONVENCIONALES</i>	11
4.2. <i>ACEITES VEGETALES ALTERNATIVOS</i>	13
4.3. <i>ACEITES DE FRITURA USADOS (WCO)</i>	13
4.4. <i>GRASAS ANIMALES</i>	13
4.5. <i>ALGAS</i>	14
4.6. <i>OTRAS FUENTES</i>	14
4.7. <i>DIFERENCIAS ENTRE MATERIAS PRIMAS</i>	14
<b>BLOQUE III: JATROPHA CURCAS</b>	<b>16</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>



<b>2</b>	<b>ASPECTOS GENERALES</b>	<b>16</b>
2.1.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	16
2.2.	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	18
2.3.	ECOLOGÍA	18
2.4.	USOS ACTUALES E HISTÓRICOS DE LA JATROPHA	19
2.5.	COMPOSICIÓN DE LA SEMILLA	19
2.6.	FICHA TÉCNICA DE LA JATROPA	20
2.7.	TÉCNICAS DE CULTIVO	21
2.8.	ANÁLISIS DEL CULTIVO Y DESARROLLO DE PLANTACIONES DE JATROPHA CURCAS	22
<b>3</b>	<b>EXTRACCIÓN DEL ACEITE</b>	<b>23</b>
3.1.	INTRODUCCIÓN	23
3.2.	EXTRACCIÓN QUÍMICA O POR SOLVENTE	23
3.3.	EXTRACCIÓN MECÁNICA	24
3.3.1.	LIMPIEZA Y CONTROL DE LAS SEMILLAS	24
3.3.2.	PROCESO DE PENSADO	24
3.3.3.	PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL PENSADO	24
<b>4</b>	<b>TECNOLOGÍAS DE PENSADO Y TIPOS DE PRENSA</b>	<b>26</b>
4.1.	PRENSAS RAM	27
4.2.	PRENSA DE TORNILLO	27
4.3.	POTENCIA REQUERIDA	29
<b>5</b>	<b>PURIFICACIÓN DEL ACEITE VEGETAL</b>	<b>29</b>
5.1.	IMPUREZAS EN EL ACEITE	30
5.2.	SEDIMENTACIÓN	30
5.3.	FILTRACIÓN	30
5.4.	MÉTODOS DE FILTRADO	30
<b>6</b>	<b>OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL</b>	<b>31</b>
6.1.	DILUCIÓN O BLENDING	32
6.2.	MICRO-EMULSIÓN	32
6.3.	PIRÓLISIS O CRACKING	32
6.4.	REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN	33
6.5.	TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA BÁSICA	34
6.6.	TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA ÁCIDA	35
6.7.	TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HETEROGÉNEA	36
6.8.	TRANSESTERIFICACIÓN CATALIZADA POR ENZIMAS	37
6.9.	TRANSESTERIFICACIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDOS	37
6.10.	EXTRACCIÓN REACTIVA Y TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU	37
6.11.	TRANSESTERIFICACIÓN NO CATALÍTICA. TRANSESTERIFICACIÓN SUPERCRÍTICA	38
<b>BLOQUE IV: ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DEL BIODIÉSEL OBTENIDO A PARTIR DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS</b>		<b>39</b>
<b>1</b>	<b>Caracterización del biodiesel obtenido del aceite de Jatropha curcas</b>	<b>39</b>
1.1.	INTRODUCCIÓN	39
1.2.	MATERIALES Y MÉTODOS	40
1.2.1.	CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS	40
1.2.2.	PROCESO BÁSICO DE OBTENCIÓN DEL BIODIÉSEL DE JATROPHA CURCAS	40
1.2.3.	ETAPA DE PRE-ESTERIFICACIÓN	40
1.2.4.	REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN	40
1.2.5.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	41
1.3.	PRUEBA EN MOTORES DIÉSEL	41
1.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
1.4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS	42
1.4.2.	RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS EN LA ETAPA DE TRANSESTERIFICACIÓN	43

1.4.3.	PRUEBA DE MOTORES	45
1.5.	CONCLUSIONES	46
<b>2</b>	<b>Estudio comparativo de la producción de biodiesel a partir de aceite de jatropha y karanja en metanol supercrítico</b>	<b>46</b>
2.1.	INTRODUCCIÓN	47
2.2.	MATERIALES Y MÉTODOS	47
2.2.1.	Materiales	47
2.2.2.	Operación	47
2.2.3.	Métodos analíticos	48
2.3.	RESULTADOS	48
2.4.	CONCLUSIONES	50
<b>3</b>	<b>OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE Y SEMILLAS DE JATROPHA CURCAS, USANDO CATALIZADORES INMOVILIZADOS Y TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU ASISTIDA POR ULTRA SONIDO</b>	<b>51</b>
3.1.	INTRODUCCIÓN	51
3.2.	METODOLOGÍA	52
3.2.1.	OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO CATALIZADORES (HIDRÓXIDO DE POTASIO, CARBONATOS)	52
3.2.2.	OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS UTILIZANDO CATALIZADOR INMOVILIZADO EN CONDICIONES DE LABORATORIO	53
3.2.3.	OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL POR MEDIO DE TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU A PARTIR DE SEMILLAS DE JATROPHA CURCAS	54
3.2.4.	OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL POR MEDIO DE TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU ASISTIDA POR ULTRASONIDO	56
3.3.	RESULTADOS	58
3.3.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	58
3.3.2.	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO HIDRÓXIDO DE POTASIO COMO CATALIZADOR	58
3.3.3.	RESULTADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO HIDRÓXIDO DE SODIO COMO CATALIZADOR	60
3.3.4.	RESULTADOS EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO CARBONATO COMO CATALIZADOR	62
3.4.	CONCLUSIONES	63
<b>4</b>	<b>Transesterificación enzimática del aceite de Jatropha</b>	<b>64</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN	64
4.2.	MATERIALES Y MÉTODOS	65
4.2.1.	PRODUCTOS QUÍMICOS	65
4.2.2.	PRODUCCIÓN DE LIPASA	65
4.2.3.	ENSAYO ENZIMÁTICO	65
4.2.4.	INMOVILIZACIÓN DE LIPASA	66
4.2.5.	CONFIGURACIÓN DE REACCIÓN PARA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN	66
4.2.6.	MUESTREO Y ANÁLISIS	66
4.3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
4.3.1.	EFFECTO DE LA RELACIÓN MOLAR SUSTRATO	66
4.3.2.	EFFECTO DE LA REACCIÓN MOLAR DEL SUSTRATO SOBRE LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL	67
4.3.3.	EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN	67
4.3.4.	EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL	68
4.3.5.	EFFECTO DE LA CANTIDAD DE T-BUTANOL	68
4.3.6.	EFFECTO DEL T-BUTANOL. DIVERSAS RELACIONES DE VOLÚMEN DE T-BUTANOL/ACEITE EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL	68
4.3.7.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN	68

4.3.8.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL	69
4.3.9.	EFFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA ADICIONAL	69
4.3.10.	EFFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL	70
4.3.11.	EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN ENZIMÁTICA	70
4.3.12.	EFFECTO DE LA CANTIDAD DE ENZIMA EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL	71
4.3.13.	REUSABILIDAD DE LA LIPASA	71
4.3.14.	ESTABILIDAD OPERATIVA DE LA LIPASA DE E. AEROGENES PARA LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL	72
4.3.15.	PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE DE LOS ÉSTERES METÁLICOS DE ACEITE DE JATROPHA	72
4.4.	CONCLUSIONES	72
<b>BLOQUE V: APLICACIÓN DEL BIODIÉSEL DE JATROPHA CURCAS EN MOTORES DIÉSEL</b>		<b>74</b>
<b>1</b>	<b>PROPIEDADES Y USO DE LAS MEZCLAS DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS Y DIÉSEL EN EL MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN</b>	<b>74</b>
1.1.	INTRODUCCIÓN	74
1.2.	MATERIALES Y MÉTODOS	75
1.2.1.	PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE	76
1.2.2.	PREPARACIÓN DE MEZCLA DE JATROPHA Y DIÉSEL	77
1.3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
1.3.1.	EFFECTO DE LA DILUCIÓN SOBRE LA VISCOSIDAD DEL ACEITE VEGETAL Y BIODIÉSEL	78
1.3.2.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VISCOSIDAD DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS Y VARIAS MEZCLAS	79
1.4.	PRUEBA DEL MOTOR	80
1.4.1.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	80
1.5.	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MOTOR Y DISCUSIÓN	81
1.5.1.	EFFECTO DE LA POTENCIA DE FRENADO (BKW) EN EL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE (SFC)	81
1.5.2.	EFFECTO DE BKW EN LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL FRENO	82
1.5.3.	EFFECTO DE BKW SOBRE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE	83
1.6.	CONCLUSIONES	84
<b>2</b>	<b>Análisis de combustión de biodiesel a base de Jatropha, Karanja y Polanga como combustible en un motor diésel</b>	<b>85</b>
2.1.	INTRODUCCIÓN	85
2.2.	PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL PARA ESTUDIO DE COMBUSTIÓN	87
2.3.	TECNOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN	87
2.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
2.4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL DEL ACEITE DE JATROPHA (JB), KARANJA (KB) Y POLANGA (PB)	89
2.4.2.	ANÁLISIS DE COMBUSTIÓN	90
2.5.	CONCLUSIONES	96
<b>3</b>	<b>EFFECTO DE LOS COMBUSTIBLES BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DIÉSEL</b>	<b>96</b>
3.1.	INTRODUCCIÓN	96
3.2.	PREPARACIÓN DE BIODIÉSEL	97
3.3.	PLATAFORMA DE PRUEBA EXPERIMENTAL	98
3.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	100
3.4.1.	EFFECTO DE LA MEZCLA DE BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE CO	100
3.4.2.	EFFECTO DEL BIODIÉSEL EN LAS AMISIONES DE CO <sub>2</sub>	101
3.4.3.	EFFECTO DEL BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE NO <sub>x</sub>	101
3.4.4.	EFFECTO DEL BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE HC	102
3.4.5.	EFFECTO DEL BIODIÉSEL SOBRE LA OPACIDAD DEL HUMO	102
3.5.	CONCLUSIONES	103
<b>4</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA MEZCLA DE BIODIÉSEL, EL RENDIMIENTO DEL MOTOR Y LAS CARACTARÍSTICAS DE EMISIONES DEL ÉSTER METÁLICO DE JATROPHA CURCAS</b>	<b>104</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN	104

4.2.	<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	104
4.2.1.	MATERIALES	104
4.2.2.	LISTA DE EQUIPO	105
4.2.3.	COMPOSICIÓN DE ÁCIDOS GRASOS	106
4.2.4.	ANÁLISIS DE PROPIEDADES	108
4.2.5.	ANÁLISIS FT-IR	109
4.2.6.	MEZCLA DE BIODIÉSEL	110
4.2.7.	PRUEBAS DE MOTOR	110
4.3.	<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	112
4.3.1.	CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS DE BIODIÉSEL-DIÉSEL DE JATROPHA	112
4.3.2.	RENDIMIENTO DEL MOTOR	115
4.3.3.	FRENO CONSUMO DE COMBUSTIBLE ESPECÍFICO	117
4.3.4.	ANÁLISIS DE LAS EMISIONES	117
4.4.	<i>CONCLUSIONES</i>	119
	<b>Referencias</b>	<b>122</b>
	<b>Glosario</b>	<b>126</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

## **BLOQUE III**

Tabla 2.5. Composición de la semilla de la *Jatropha curcas*

Tabla 2.6. Ficha técnica de la *jatropha*

Tabla 3.3.3. Parámetros de prensado

## **BLOQUE IV**

Tabla 1.2.5. Niveles de las variables del diseño experimental

Tabla 1.4.1. Propiedades físico-químicas del aceite de *jatropha curcas*

Tabla 1.4.2.1. Transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* con metanol, utilizando hidróxido de potasio como catalizador

Tabla 1.4.2.2. Transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* con metanol, utilizando metóxido de sodio como catalizador

Tabla 1.4.2.3. Modelos para correlacionar las variables de respuesta y las variables independientes

Tabla 1.4.2.4. Selección de las mejores condiciones experimentales

Tabla 1.4.3. Consumo específico de combustible

Tabla 2.2.1. Composición en ácidos grasos de los aceites investigados.

Tabla 3.3.1. Caracterización físico-química del aceite de *Jatropha curcas*

Tabla 3.3.2. Resultados del rendimiento de acuerdo con diseño experimental

Tabla 3.3.3. Resultados del rendimiento de acuerdo con diseño experimental

Tabla 3.3.4. Valores máximos de rendimiento para el biodiésel obtenido por técnicas experimentales

## **BLOQUEV**

Tabla 1.2.1. Propiedades físicas y químicas de la mezcla de diésel y aceite de jatropha

Tabla 1.2.2. Propiedades de las mezclas de jatropha-diésel

Tabla 1.4.1. Detalles técnicos del motor

Tabla 2.4.1. Propiedades del biodiésel de Jatropha (JB), Karanja (KB), Polanga (PB), Diésel y sus mezclas

Tabla 2.4.2. Parámetros de combustión de combustibles de prueba en motores diésel con carga máxima

Tabla 3.2. Propiedades físicas y químicas de las mezclas de biodiésel en comparación con el combustible diésel de acuerdo con los estándares ASTM

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del motor diésel

Tabla 4.2.1. Propiedades del aceite crudo de jatropha

Tabla 4.2.2. Resumen del equipo utilizado para medir las propiedades

Tabla 4.2.3.1. Condiciones de funcionamiento del GC

Tabla 4.2.3.2. Composición de ácidos grasos del biodiésel de Jatropha

Tabla 4.2.4. Principales propiedades fisicoquímicas del biodiésel de Jatropha en comparación con el biodiésel de palma

Tabla 4.2.5. Picos de características de JBD en espectros FT-IR

Tabla 4.2.7.1. Detalles de la especificación del motor

Tabla 4.2.7.2. Detalles del analizador de gases de escape

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

## BLOQUE III

Ilustración 2.1.1. Árbol *Jatropha Curcas*

Ilustración 2.1.2. Flor *Jatropha Curcas*

Ilustración 2.1.3. Fruto *Jatropha Curcas*

Ilustración 2.1.4. Semilla *Jatropha Curcas*

Ilustración 2.1.5. Diferentes partes de la planta de la *Jatropha Curcas*

Ilustración 2.4. Esquema con los diversos usos de las diferentes partes de la planta de la *Jatropha curcas*

Ilustración 2.7.1. Semilla *Jatropha curcas* para plantación a partir de granos

Ilustración 2.7.2. Planta *jatropha curcas* para plantación a partir de platinos

Ilustración 2.7.3. Planta *jatropha curcas* para plantación a partir de brotes

Ilustración 4.1. Prensa RAM

Ilustración 4.2.1. Prensa tipo cilindro agujereado

Ilustración 4.2.2. Prensa tipo filtro

Ilustración 6.3. Reacción pirólisis

Ilustración 6.4.2. Descomposición triglicéridos/diglicéridos/monoglicéridos

Ilustración 6.5.1. Transesterificación catalítica homogénea básica

Ilustración 6.5.2. Formación de jabones en la reacción de hidrólisis de los ésteres generados

Ilustración 6.6.1. Reacción de transesterificación catalítica homogénea ácida

Ilustración 6.6.2. Generación de biodiésel al mismo tiempo que se efectúa una esterificación de los FFA

Ilustración 6.7. Transesterificación catalítica heterogénea

## **BLOQUE IV**

Ilustración 1.4.3. Temperaturas de los gases de escape

Ilustración 2.3.1. Conversión de triglicéridos (aceite de jatropha).

Ilustración 2.3.2. Conversión de triglicéridos (aceite de karanja).

Ilustración 2.3.3. Rendimiento de biodiesel (aceite de Jatropha).

Ilustración 2.3.4. Rendimiento de biodiesel (aceite de Karanja).

Ilustración 3.2.1. Montaje experimental para la transesterificación

Ilustración 3.2.2. Etapas en el proceso de inmovilización del catalizador

Ilustración 3.2.3. Secuencia experimental en la adecuación de la semilla de *Jatropha curcas*

Ilustración 3.2.4.1. Montaje de transesterificación in situ asistida por ultrasonido

Ilustración 3.2.4.2. Secuencia experimental de la transesterificación in situ asistida por ultrasonido

Ilustración 4.3.1. Nivel óptimo de concentración de metanol para la síntesis máxima de biodiésel

Ilustración 4.3.3. Efecto de la velocidad de agitación

Ilustración 4.3.5. Efecto de la cantidad de T-butanol

Ilustración 4.3.7. Efecto de la temperatura de reacción

Ilustración 4.3.8. Gráfico de Arrhenius de la energía de activación para la síntesis de biodiésel por lipasa *E. aerogenes*

Ilustración 4.3.9. Efecto del contenido de agua adicional

Ilustración 4.3.11. Efecto de la concentración enzimática

Ilustración 4.3.13. Reusabilidad de la lipasa

## **BLOQUE V**

Ilustración 1.3.2. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad del aceite de jatropha y diversas mezclas

Ilustración 1.5.1. Efecto de la potencia de frenado en el consumo de combustible específico para diésel, aceite de jatropha curcas y varias mezclas



Ilustración 1.5.2. Variación de la eficiencia térmica del freno con potencia de frenado para diésel, aceite de jatropha curcas y varias mezclas

Ilustración 1.5.3. Efecto de la potencia de frenado sobre la temperatura de los gases de escape del diésel, el aceite de jatropha curcas y varias mezclas

Ilustración 2.3. Diagrama esquemático de la configuración de prueba para el estudio de combustión

Ilustración 2.4.2.1. (a) Presión vs. ángulo de arranque para diésel, biodiesel Jatropha y mezclas a plena carga. (b) Presión vs. ángulo de arranque para diésel, biodiésel Karanja y mezclas a plena carga. (c) Presión versus ángulo de arranque para diésel, biodiesel Polanga y mezclas a plena carga.

Ilustración 2.4.2.2. Efecto de la carga sobre el retraso de ignición para diésel, biodiésel y sus mezclas

Ilustración 2.4.2.3. (a) Velocidad de liberación de calor para diésel, biodiesel Jatropha y mezclas a plena carga. (b) Velocidad de liberación de calor para diésel, biodiésel Karanja y mezclas a plena carga. (c) Velocidad de liberación de calor para diésel, biodiésel Polanga y mezclas a plena carga.

Ilustración 3.3. Diagrama esquemático de un motor de prueba diésel

Ilustración 3.4.1. Variación de la emisión de CO con carga del motor para mezclas de biodiésel

Ilustración 3.4.2. Variación de la emisión de CO<sub>2</sub> con carga del motor para mezclas de biodiésel

Ilustración 3.4.3. Variación de la emisión de NO<sub>x</sub> con la carga del motor para mezclas de biodiésel

Ilustración 3.4.4. Variación de la emisión de HC con carga del motor para mezclas de biodiésel

Ilustración 3.4.5. Variación de la emisión de humo con carga del motor para mezclas de biodiésel

Ilustración 4.2.5. Espectro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) del JBD

Ilustración 4.2.7. Configuración de prueba del motor

Ilustración 4.3.1. Efecto de mezcla sobre (a) viscosidad cinemática (b) densidad (c) punto de inflamación (d) valor calorífico (e) estabilidad a la oxidación

Ilustración 4.3.2. (a) Características de la velocidad de par (b) características de la velocidad de potencia del freno (c) variación de BSFC con respecto a la velocidad.

Ilustración 4.3.4. (a) Emisión promedio de NO<sub>x</sub> para todas las muestras de combustible a la velocidad máxima del motor, (b) emisión promedio de HC para todas las muestras de combustible a la velocidad máxima del motor (c) emisión promedio de CO para todas las muestras de combustible a la velocidad máxima del motor.



# BLOQUE I: BIOCOMBUSTIBLES

---

## 1 INTRODUCCION

---

Se denomina biocombustible a aquellos materiales que provienen de la materia vegetal y de residuos animales. Son renovables y no producen riesgo para el medioambiente, como lo hacen otros combustibles como el petróleo, el carbón o el gas natural.

La idea de los biocombustibles aparece a finales del siglo XIX con el uso de hidrocarburos como fuente de energía. Se pretendía el uso de aceites vegetales como combustible para motores de combustión interna. Fue en el año 1895 cuando Rudolf Diésel creó el primer motor diésel funcionando con aceites vegetales. Más tarde, a principios del siglo XX, Henry Ford comenzó a usar biocombustible para mover su famoso automóvil modelo T, el cual esperaba usar el etanol como biocombustible.

La cantidad de depósitos de petróleo por aquella época mantuvo el diésel y la gasolina a un precio muy barato durante mucho tiempo, lo que hizo que los biocombustibles se quedasen apartados. Sin embargo, la progresiva preocupación por el calentamiento global debido a la emisión del dióxido de carbono junto con el elevado precio del petróleo, han hecho que los biocombustibles vuelvan a ser motivo de principal interés.

## 2 GENERACIONES DE BIOCOMBUSTIBLES

---

Las generaciones de biocombustibles representan ciertas ventajas respecto a la adquisición de los combustibles fósiles, siendo la principal la regeneración de los recursos.

Con el fin de mejorar la obtención de los biocombustibles y disminuir los inconvenientes de su producción, se pueden dividir en 4 generaciones diferentes.

### Biocombustibles de primera generación

Los biocombustibles de primera generación son aquéllos provenientes de cultivos agrícolas. Dichos cultivos son cultivados únicamente para la producción de combustible. El aceite vegetal, azúcar o almidón obtenidos de los cultivos agrícolas se transforman en bioetanol, biodiésel o biogás principalmente a través del proceso de transesterificación.

### Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación son aquellos fabricados a partir de diferentes tipos de biomasa. Se distinguen fundamentalmente respecto a los biocombustibles de primera generación en que provienen de vegetales que no poseen una función alimentaria, por lo que no tienen la obligación de cultivarse en tierras

destinadas para el cultivo de alimentos, sino en tierras marginales.

Estos biocombustibles tienen ciertas ventajas, como pueden ser el no competir con la función alimentaria al disponer de una gran variedad de materias primas y no ser comestibles, no requerir el uso intensivo de agroquímicos, el agua consumida es generada por los propios bosques debido a la función ecosistémica de generación de las lluvias o reducir los costos de producción a largo plazo respecto a los biocarburantes actuales.

Los principales inconvenientes a los que se enfrenta esta generación de biocombustibles son los altos costos a los que se enfrenta debido a la comercialización por el elevado gasto de la manufactura, y la posible pérdida de hábitats naturales por los monocultivos.

#### Biocombustibles de tercera generación

Estos biocombustibles se fundamentan en la filosofía de explotación de microalgas.

La generación de biocombustibles a través del cultivo de estos organismos tiene muchas ventajas como, al igual que los combustibles de segunda generación, no ocupar ni afectar el terreno de cultivo alimentario. Tiene una tasa de crecimiento muy elevada respecto a la de los vegetales terrestres, lo que hace que la tasa de producción de triglicéridos sea hasta 15 veces mayor a la de cultivos tradicionales. Y se pueden cultivar todo el año al no tener limitaciones ni alteraciones temporales.

La teoría es sencilla, pero a la vez complicada de llevar a la práctica real. Consiste en el cultivo de varias especies de algas, altas en azúcares o lípidos, administrando tanto el CO<sub>2</sub> y la luz que precisan como los nutrientes necesarios de una forma controlada, además de otros parámetros del cultivo como pueden ser la temperatura, pH, etc.

Las más conocidas son las microalgas cultivadas para la producción de biodiésel, utilizándose también para el tratamiento de aguas residuales.

#### Biocombustibles de cuarta generación

Los biocombustibles de cuarta generación son aquéllos que llevan un paso adelante a los biocombustibles de tercera generación.

Se basa en la capacidad de captar y almacenar el carbono, pues son elaborados a través de bacterias modificadas genéticamente que utilizan CO<sub>2</sub> u otra fuente de carbono para la producción de biocombustible.

Esta generación se diferencia del resto en que, en ésta, es la misma bacteria la que realiza todo el proceso de fabricación del biocombustible.

De esta manera, los biocombustibles de cuarta generación se creen más positivos a la reducción de las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), al ser más neutros en carbono al compararse los el resto de biocombustibles de las demás generaciones.

## **3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS BIOCOMBUSTIBLES**

---

Entre los beneficios ligados a la utilización y producción de los biocombustibles, se encuentran los siguientes:

-Los biocombustibles al ser un recurso renovable se muestran como una considerable alternativa al agotamiento paulatino de las energías fósiles, que ocasionan un gran impacto dañino para el medio ambiente.

-Proveen una fuente de energía inagotable, apoyando el reciclaje, obsequiando el desarrollo de productos como biodiésel o etanol como objetivos, los cuales son formas energéticas que aminoran de manera destacada la emisión de GEI (se estima que en el caso del bioetanol un 12% y un 41% en caso del biodiésel).

-Los biocombustibles ayudan a mejorar la explotación de las tierras agrícolas que se mantienen a un lado por

su escasa rentabilidad con el cultivo tradicional.

-La utilización de este tipo de combustible ayuda a la conservación para un mejor estado de los motores de los vehículos.

-Permite dar de lado los aditivos que producen una alta contaminación ambiental, como es el caso del bioetanol que puede suplir a la nafta como lo hacen en Brasil mediante el alcohol de caña.

-El coste de producción es menor que el de la gasolina o el diésel, así mismo, los países podrán defender su integridad frente a probables ataques de forma más asequible al disminuir la dependencia de combustibles provenientes del extranjero.

-La producción de biocombustibles son la opción principal de aquellos países que no producen petróleo y que están en vías de crecimiento.

Los biocombustibles presentan también una serie de desventajas que se presentan a continuación:

-El principal inconveniente se debe a que, en su producción, se suele liberar más CO<sub>2</sub> del que se ahorraría en su uso. Esto puede deberse a diversos motivos como pueden ser los procesos de fabricación de estos combustibles o los fertilizantes.

-Se necesitan enormes cantidades de agua para mantener los cultivos destinados a la producción de los mismos.

-A la hora de la producción se requiere grandes superficies de cultivo, por lo que se produce una considerable pérdida de áreas forestales (importantes consumidoras de CO<sub>2</sub>).

-Varios estudios afirman que, aunque sus componentes a la hora de ser quemados no contaminan, sí podría haber algún daño hacia el medioambiente durante el proceso de fabricación de los mismos.

-El impacto ambiental negativo a la hora de la obtención de la materia prima necesaria para su elaboración, debido a los procesos dedicados a la obtención de los elementos naturales y vegetales para su fabricación. Los puntos más negativos pueden ser la pérdida de biodiversidad, la deforestación y la degradación de los suelos, pues esto hace que existan cultivos destinados a la obtención de la materia prima y no para el consumo humano o creación de nuevos ecosistemas. Lo que trae finalmente la subida de precios de los alimentos.

Si bien la producción de biocombustible trae consigo algunos inconvenientes, se considera favorable para el medioambiente.

Comparándose el uso del biodiésel respecto al diésel de petróleo, el biodiésel emite 48% menos de CO, 47% menos de material particulado y un 67% menos de hidrocarburos. De igual forma, el bioetanol reduce la emisión de GEI y el biogás es realmente una alternativa de energía renovable, ya que admite reutilizar residuos y reduce uno de los principales problemas ecológicos como es la deforestación.

## 4 TIPOS

---

Este trabajo se centra en la obtención y producción del biodiésel y los derivados del mismo, aunque se detallará en este apartado algo más de información acerca del bioetanol y el biogás, ya que, junto con el biodiésel, forman los tres grupos más importantes de los biocombustibles.

### 4.1. BIOETANOL

El bioetanol es un tipo de alcohol inflamable que se consigue a través de la fermentación de varios tipos de material orgánico, especialmente la materia de origen vegetal ricos en almidones o azúcares con un gran

contenido en celulosa.

Las más empleadas actualmente en la obtención del bioetanol son los cereales, la remolacha y la caña de azúcar, estando las dos primeras entre los cultivos más usuales en Europa y Estados Unidos, y siendo la caña de azúcar más característico de los países con climas tropicales.

De esta manera, se pueden sembrar estos cultivos con la finalidad de destinarlos únicamente a esta función. Así pues, a parte de poder producir bioetanol a partir de sembradíos hechos ex profeso, asimismo se puede conseguir a partir de restos de materia orgánica de diferentes fuentes como de los cereales destinados a la manutención o de la silvicultura. Así, nos encontramos ante una materia de tipo renovable, pues si se logra a través de la materia orgánica llevada a la práctica mediante un uso correcto y una gestión eficiente, se podría beneficiar si un tiempo de extinción.

El bioetanol tiene equivalentes usos que los combustibles que se queman para la consecución de diferentes tipos de energía. Los principales usos son:

-Producción de ETBE (etil terciar-butil éter) a través de biometanol.

-Combinación directa con gasolina.

-Combustible principal en motores de gasolina.

El bioetanol presenta una serie de ventajas, aunque primeramente habría que tener en cuenta que produce CO<sub>2</sub> en su combustión, por lo que no representaría la idea de una fuente de energía estrictamente limpia. En realidad, el CO<sub>2</sub> emitido proviene del CO<sub>2</sub> que absorbe la planta al crecer, por lo que hay gente que considera que, si omitimos el CO<sub>2</sub> emitido para el transporte y producción del mismo, el rastro de combustión de este combustible será indiferente ya que el CO<sub>2</sub> emitido ha sido absorbido de la atmósfera anteriormente.

Por el contrario, otro factor a tener en consideración en el uso de este combustible es que, los niveles de GEI que emite son cuantiosamente más bajo al compararse con el petróleo o la gasolina. Esto se debe al proceso propio que tiene el bioetanol para su producción y a un aspecto logístico que es que se puede fabricar en cualquier lugar, lo que hace considerablemente más bajo su coste de traslado al poder fabricarse a nivel local y usarse en la propia región donde se produce.

Por otro lado, el uso de este biocombustible conlleva a una deflación de los residuos que se producen en una localidad, pues mediante un método de reciclado y separación apropiado, gran parte de los restos de basura orgánica generadas por una vivienda pueden ser predestinados a la producción de bioetanol, consiguiendo un conjunto final menor de la basura producida.

Por último, otro factor a tener en cuenta es que conlleva a un impacto social menor que la utilización de combustibles fósiles. Como se ha hablado anteriormente, como este biocombustible se puede producir en cualquier lugar físico, la forma más eficiente sería a través de producción local, lo que trae consigo una generación de puestos de trabajo en dicho entorno.

## 4.2. BIOGÁS

El biogás es un combustible gas que nace de las reacciones químicas que ejecutan algunos microorganismos, en especial bacterias, al nutrirse de la materia orgánica en descomposición. Esto ocurre cuando se alimentan de materia orgánica muerta, que es lo que se conoce como putrefacción o descomposición. Es decir, dichos organismos son seres vivos descomponedores y producen ciertos gases que pueden ser utilizados como combustibles.

Sin embargo, para poder obtener este tipo de gas es preciso que se den ciertas condiciones, como que se de en una atmósfera sin oxígeno, es decir, un lugar anaeróbico. Este entorno sería necesario para que dichas bacterias puedan realizar este proceso de manera que el gas pueda ser apropiado para el uso humano.

La composición del biogás es muy diversa, aunque en la mayor parte de casos, se podría afirmar que contiene en torno al 50%-70% del total de gas metano, una cantidad considerable de CO<sub>2</sub> y, en más pequeñas cantidades oxígeno, hidrógeno y otros gases.

Realmente, una de las principales ventajas del biogás es que se puede obtener de cualquier tipo de materia orgánica en descomposición, como los desechos y basuras de ciertas industrias o desperdicios de las viviendas.

Así mismo, este tipo de biocombustible se considera una fuente de energía renovable, pues las materias primas que se utilizan en su producción son renovables. También es ecológico, al no usarse oxígeno en la producción del mismo, lo que significa que no puede haber combustión. La ausencia de la misma hace que la emisión de GEI a la atmósfera sea nula, aunque durante el proceso de descomposición biológica se produce CO<sub>2</sub>, así como en la utilización del mismo biocombustible. La diferencia es que se produce una cantidad considerablemente menor que la que producen los combustibles fósiles, y así equilibra el CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

Para la producción de este gas se utiliza una tecnología bastante barata, pues las plantas de biogás se pueden producir en casa mediante materiales de origen local. Este gas se podría utilizar para generar electricidad o cocinar, así como sustituto del gas natural o para alimentar automóviles si se comprime y se consigue una gran calidad. Las materias primas que se usan para la producción del mismo son prácticamente gratuitas, pues pueden ser restos de alimentos, residuos de cultivo, estiércol o lodos de aguas residuales. Esto hace que el coste de producción sea relativamente bajo.

Por el contrario, el biogás presenta algunos inconvenientes, como los pequeños avances tecnológicos del mismo ya que en su producción los sistemas utilizados no son realmente eficientes. No existen las tecnologías suficientes para hacerlo de bajo costo y simplificar el proceso. Lo que hace que no sea posible una producción a gran escala para complacer a una gran población.

Otra desventaja que presenta este biocombustible es que incluso luego de la compresión y el refinado sigue teniendo impurezas, es decir, puede corroer los motores de los automóviles y generar grandes costes en mantenimiento si se utiliza como combustible de los mismos.

Por último, comparándose con el resto de los biocombustibles, el biogás no es tan atractivo económicamente en lo que refiere a la producción, y menos a tan gran escala. Resulta muy complicado aumentar la eficiencia de las plantas de biogás, lo que revela el por qué la gente y casi todos los gobiernos se muestran retraídos a la hora de invertir en este biocombustible. Por lo que se necesitará una gran inversión para que el biogás se convierta en una fuente de combustible viable.

### **4.3. BIODIÉSEL**

El biodiésel es un tipo de biocombustible sintético líquido que se adquiere mediante lípidos naturales como grasas animales o aceites vegetales. Se obtiene mediante procesos industriales como la esterificación o transesterificación, y se emplea en la preparación de sustitutos parciales o totales del gasóleo o petrodiesel derivado del petróleo. Si es total se denomina B100, por el contrario, se denominará B- seguido del número que hace referencia al tanto por ciento o referencia de biodiésel usado en la mezcla.

Este tipo de biocombustible no es un descubrimiento de las últimas décadas ni mucho menos de la actualidad, pues ya había desarrollado mucho antes Rudolf Diésel un motor diésel que funcionaba con aceites vegetales como combustible.

Presenta una serie de ventajas, principalmente algunas como la disminución notable de las emisiones de los vehículos, tales como el CO y los hidrocarburos volátiles en el caso de motores de gasolina, y las partículas en caso de motores diésel.

También la producción del mismo constituye una alternativa de utilización del suelo que impide los fenómenos de desertificación y erosión a los que se exponen aquellas tierras agrícolas a las que están renunciando los agricultores.

Otra característica de este biocombustible es que constituye un ahorro de entre un 25%-80% de las emisiones de CO<sub>2</sub> ocasionadas por combustibles procedentes del petróleo, formando un elemento importante para reducir los GEI producidos por el transporte. Además, reduce el desgaste de la bomba de inyección debido a su mayor índice de cetano y lubricidad, así como que, al no tener compuestos de azufre, no los elimina como gases de combustión.

En cambio, a pesar de sus ventajas, presenta ciertos problemas. Uno de ellos proviene de su mejor capacidad solvente frente al petrodiesel, lo que hace que los residuos existentes sean disueltos y mandados por la línea de combustible, atacando así los filtros.

Otro problema pertenece al área logística de almacenamiento, ya que al ser un producto degradable e hidrófilo se necesita una planificación estricta de su producción y expedición.

Para concluir, el rendimiento promedio para oleaginosas como el arroz, algodón, soja, girasol, maní o rocino se estima en 900 litros por hectárea cosechada de biodiesel. Esto hace que pueda ser poco práctico en países con una escasa superficie cultivable, aunque la gran variedad de semillas capacitadas para su producción hace que sea sustentable.

## 5 MARCO NACIONAL Y EUROPEO

---

Después del último barómetro sobre biocombustibles del Observatoire des Energies Renouvelables (EurObserv'ER) como el "Estudio del impacto macroeconómico de las energías renovables en España en 2018" de la APPA (Asociación de Empresas de Energías Renovables) confirman el aumento en el consumo, empleo y negocio de los biocarburantes en España. En nuestro país el biodiesel ha sido el responsable de que el consumo global aumente un 27% en 2018, y en la Unión Europea (UE) ha sido una subida del 10.1%.

En 2017, ya se dio señales de un aumento considerable sobre el impacto macroeconómico referido a los biocombustibles según el correspondiente estudio de la APPA. En 2018, de manera más moderada, crecieron las cifras visiblemente. La contribución al PIB subió un 7.7% hasta superar los 824 millones de euros, siendo el biodiesel el mayor portador con 696.5 millones.

El informe de EurObserv'ER en la UE referente a 2018 también confirmó una tendencia al alza del sector en 2017, un control casi completo del biodiesel y el crecimiento del consumo notablemente en España. Si en la UE el consumo de biocombustibles se incrementó un 10.1%, en España lo hizo hasta un 27%, lo que hizo que se pasara de 1.369.000 de toneladas equivalentes de petróleo (tep) en 2017 hasta 1.728.000 de tep en 2018, subiendo a un tercer puesto de los países más consumidores.

Perteneciendo 1.568.000 de tep de las 1.728.000 al biodiesel y 160.000 correspondientes al bioetanol. Además, el estudio de la APPA sitúa en España unas 1.767.129 toneladas la producción de plantas de biodiesel y en 412.452 las de bioetanol, estando las dos cifras en el récord histórico alcanzando las mejores ratios de utilización de la capacidad instalada: 56% en el biodiesel y 108% en el bioetanol.

EurObserv'ER detalla el aumento del consumo de la UE (17 millones de tep con casi un 100% certificado como sostenible) debido al incremento en las cuotas u objetivos de incorporación de biocombustibles en el transporte de varios países. Además, asegura que entre 2018 y 2020 esta tendencia irá a más al aumentas dichas cuotas.

De los 17 millones de tep, 13.9 Mtep corresponden al biodiesel (incluyendo el hidrobiodiesel); 2.9 Mtep al bioetanol; y unas 160.000 tep al biometano (repartidas prácticamente entre Suecia con 118.000 y Alemania con 34.000).

Según los cálculos de EurObserv'ER, el consumo de biocarburantes podría sobrepasar los 20 Mtep e incluso llegar a los 20 Mtep a finales de 2020. Según los cálculos de la Comisión Europea, la producción alcanzará los 36 Mtep en 2030, sin embargo, EurObserv'ER no está de acuerdo con esta cifra debido a un interés menor en los agrocombustibles con un gran efecto del cambio indirecto de la utilización de la tierra y la subida de la importancia respecto a la movilidad eléctrica.

El biodiesel obtuvo una cuota del 6.7 en los gasóleos en 2018. Respecto a la explicación del aumento del consumo en España, el estudio de la APPA se ajusta dentro de la subida tanto de la obligación de biocarburantes (que pasó de un 5% a un 6% de 2017 a 2018), como de la venta de combustibles de automoción (2.5%). La cuota real del propio consumo en gasóleo en términos energéticos pasó de un 5.3% a un 6.7% de 2017 a 2018. Y de un 2.9% a un 3.1% en gasolina.



En el mercado del biodiésel, su cuota de mercado nacional ha descendido por tres años seguidos hasta el 58.2% (92.9% en 2015, 75% en 2016 y 62.6% en 2017), aunque los productores españoles han subido sus ventas en el país un 32.5%. La APPA expone que lo que contribuyó a que se incrementaran un 59.2% el total de ventas de biocarburantes importados en España, fue la decisión en 2018 por parte de la UE de eliminar los derechos antidumping que se aplicaban al biodiésel indonesio y argentino desde 2013.

En 2018 ha crecido el consumo de aceite de soja y ha bajado el de palma, y los empleos lo han notado. Dicho año ha sido el primero desde 2012 que no ha cerrado ninguna planta de biodiésel. En estos momentos hay 4 plantas de bioetanol y 20 de biodiésel, generando un total de 4.483 empleos en 2018, de los cuales 2.798 eran empleos directos y 1.685 indirectos, según la APPA.

Sin embargo, España tiene que ajustar su consumo y producción progresivamente a una normativa europea que cada vez polemiza más la utilización del aceite de palma, la principal materia prima en nuestro país para la producción de biocarburantes. En 2018 ya se consumió un 55.4% de este tipo de biodiésel, una cifra mucho menor respecto a otros años, y el aceite de soja ha doblado sus números llegando al 34.5%.

# BLOQUE II: BIODIÉSEL

---

## 1 INTRODUCCIÓN

---

El biodiésel es un tipo de biocombustible que se define como una combinación de ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, que se obtienen a raíz de los diferentes procesos de producción de cualquier tipo de grasa animal o aceite vegetal. Puede ser utilizado parcial o totalmente para sustituir el diésel de los motores de combustión interna sin la necesidad de una modificación sustancial de los mismos.

Los ésteres de este biocombustible se caracterizan por sus propiedades físicas como la densidad, calor de combustión, viscosidad, volatilidad, índice de yodo, índice de ácido...

El uso de aceites vegetales y animales para la producción de biodiésel tiene un interés considerable debido a su naturaleza renovable y menos contaminante con respecto al diésel convencional. La principal aplicación de este biocombustible es como carburante para vehículos diésel, aunque también se usa como sustitución al gasóleo C de calefacción. A parte de unas mejores características desde el punto de vista energético y ecológico, despunta también la posibilidad de utilizarse de una manera inmediata en los motores diésel debido a que el biodiésel produce una completa y correcta combustión, sin necesidad de ningún tipo de cambio en los motores existentes, pudiendo alimentarse de forma alternativa mezclado con gasoil en cualquier producción.

## 2 VENTAJAS E INCONVENIENTES

---

Entre las ventajas más importantes al emplearse el biodiésel, podemos encontrar las siguientes:

- Preservación de los recursos naturales del planeta, al considerarse una fuente de energía de origen renovable.
- Si se cuenta con una propia producción de biodiésel, se reduce la importación del mismo. Así, la dependencia energética que se tiene de los combustibles fósiles, siendo de un 80% en España, también disminuiría.
- Disminuir la contaminación de suelos y los riesgos de toxicidad en caso de que se derrame accidentalmente, al ser un producto no tóxico y biodegradable.
- Su contenido de azufre es prácticamente nulo, de forma que no emitirá SO<sub>2</sub> en los humos y, por lo tanto, no contribuirá al efecto de la lluvia ácida.
- El CO<sub>2</sub> que se produce es el agregado por las plantas durante la fotosíntesis, por lo que no contribuirá a la emisión de GEI.
- Al poseer un alto valor lubricante, facilitará su empleo en el pistón.
- Generalmente, el biodiésel es más eficiente y más fácil de producir que el diésel convencional.
- Este biocombustible podría producirse de forma local fructificando los recursos o los cultivos locales, por lo que, al ser una fuente de energía autóctona, ayudará en la región con todas las ventajas sociales y económicas que ello representa.

También cuenta con algunos inconvenientes tales como:

- Su coste frente al diésel convencional aún no lo hace competitivo.
- Referente a las propiedades técnicas, tiene un poder calorífico menor,
- Al tener un elevado poder disolvente, debería almacenarse en tanques limpios, ya que al no hacerlo se podrían contaminar los motores con impurezas derivadas de los tanques.
- Tiene malas propiedades en frío, lo que lo convierte en incompatible en temperaturas muy bajas.
- Es corrosivo de algunas variantes de plásticos utilizados actualmente en algunos motores diésel, por lo que habría que sustituirlos.
- Tiene mayores puntos de fluidez y turbidez, viscosidad cinemática y emisiones de NOx.
- Con respecto a los costes de producción, lo más influyente en el coste final es el de las materias primas, el cual supone entre el 60-75% aproximadamente del coste total de producción.

## 3 PROPIEDADES DEL BIODIÉSEL

---

La materia prima empleada en la producción de biodiésel contiene un perfil de ácidos grasos que coincide con la cadena de carbonos del metil-éster que se obtiene en la transesterificación. Es por ello por lo que, en virtud de la gran variedad de aceites vegetales y grasas animales, y a los diferentes perfiles de ácidos grasos tan poco parecidos de cada uno de ellos, se obtendrán una variedad de biocombustibles con diferentes características entre sí.

Por otro lado, durante la transesterificación se produce glicerol en la reacción como producto secundario, a parte de otros compuestos derivados de los compuestos intermedios y de lípidos que, aunque pasen por una etapa de purificación no pueden separarse completamente, por lo que se podrá encontrar en pequeñas proporciones e incluso en trazas en dicho combustible.

Para conseguir la seguridad y calidad del biodiésel a producir, se necesita que éste cumpla con ciertas propiedades y especificaciones. Por ello, detallaremos algunas de las propiedades principales por las que se deben regir cualquier tipo de biodiésel.

### VISCOSIDAD

Es una propiedad de los fluidos que calcula las fuerzas internas de fricción que existen entre las diferentes capas de un fluido, y que dificulta a su movimiento. En el biodiésel se puede encontrar entre 3 y 6 mm<sup>2</sup>/s.

Es un parámetro decisivo para la producción del biocombustible ya que si ésta es demasiado alta se podría producir una pésima atomización del biocombustible en la cámara de combustión, ocasionando una combustión incompleta. A un mismo tiempo, podrían producirse depósitos de carbono en los inyectores, y se necesitaría una potencia mayor en la bomba de inyección.

La elevada viscosidad de las grasas animales y aceites vegetales es la razón principal por la que es necesaria la reacción de transesterificación, puesto que la viscosidad de los ésteres metílicos es muy parecida y mucho menor a las del diésel convencional.

### DENSIDAD

Es otro parámetro de los más importantes a tener en cuenta puesto que, dependiendo de ésta, se va a determinar la masa del combustible que se inyectará en la cámara, y en virtud de ello la relación aire-combustible de la misma. Según la normativa europea debe de estar entre 860 y 900 Kg/m<sup>3</sup>. A unos valores más inferiores se produciría un incremento del consumo del carburante.

### ÍNDICE O NÚMERO DE CETANO (CN)

Es un parámetro que simboliza el tiempo a transcurrir entre la inyección del combustible y la iniciación de su combustión. La mayoría de motores se diseñaron para funcionar con combustibles con un CN entre 40 y 50, ya que, si éste fuese muy alto o muy bajo, originarían problemas en el motor.

Si sobrepasase muy por encima este valor, generaría una rápida ignición, antes de que la unión aire-combustible fuese adecuada y por tanto ocasionaría un aumento de las emisiones y unas combustiones incompletas.

Por el contrario, si no se llegase a este índice, se produciría un retraso en la ignición, lo que traería consigo un calentamiento del motor más lento y provocaría una combustión más tardía e ineficaz.

Por conclusión, se trata de un gran parámetro para medir la calidad de ignición de los carburantes.

#### ÍNDICE DE ACIDEZ

Facilita una ponderación del número de ácidos grasos libres que se encuentran en el combustible. Si se sobrepasa ciertos límites podría resultar corrosivo para el motor.

#### ÍNDICE DE YODO

Es un parámetro que se utiliza para medir el grado de insaturación en lípidos. Se denota de esta forma porque se emplea frecuentemente un método volumétrico que usa yodo para la medición de dobles enlaces, pues cada molécula de yodo reacciona con un doble enlace C-C (carbono-carbono). Por lo tanto, este parámetro mide la cantidad de masa de yodo (en gramos) que reacciona con una cantidad de 100 g del compuesto deseado.

#### PUNTO DE INFLACIÓN

Se conoce también como *Flash Point* y es la mínima temperatura a la que los gases de un compuesto volátil comienzan la combustión junto con una fuente de ignición. En el caso del biodiésel, este parámetro resulta bastante más alto que el gasóleo mineral, lo que hace del mismo un compuesto más seguro.

A parte, nos muestra la presencia de metanol, pues a medida que aumenta en el biodiésel el porcentaje de metanol, el punto de inflamación desciende rápidamente.

#### CONTENIDO EN ÉSTERES METÁLICOS

Este parámetro nos muestra el contenido estricto de biodiésel, pues son los ésteres alquílicos los que contienen características muy parecidas al diésel. Para su utilización, debería encontrarse una composición mínima de dichos ésteres metílicos.

#### ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN

Ésta es una de las características más importantes, pues cuando este biocombustible sufre oxidación se degrada, incrementando el número de depósitos y sedimentos. En términos generales, el biodiésel presenta una oxidación superior a la del diésel convencional.

#### CORROSIÓN A LA LÁMINA DE COBRE

Este parámetro se utiliza con el fin de determinar sustancias corrosivas que pueden atacar a los componentes de cobre que se encuentren en el motor, así como ciertas aleaciones de éste como el bronce.

#### CONTENIDO EN AGUA

El contenido en agua en un biocombustible presenta muchas desventajas, pues los catalizadores alcalinos homogéneos forman geles y espumas al reaccionar con el agua. Aumenta la corrosión y favorece la expansión de microorganismos que pueden llegar a provocar oclusiones. También es responsable de generar ácidos grasos libres al producirse reacciones de hidrólisis.

#### CONTENIDO EN CENIZAS SULFATADAS

Si se encuentran cenizas al realizar una combustión completa se produce un taponamiento y ensuciamiento de inyectores y filtros. La presencia de jabones metálicos en este biocombustible suele producir cenizas sulfatadas.

#### CONTENIDO EN AZUFRE

El contenido de azufre en el biodiésel es el responsable de la emisión de los óxidos de azufre. Aunque es normal que la materia prima utilizada suele contener composiciones muy pequeñas de azufre, es cierto que hay ciertos tipos como la colza y la mostaza que pueden llegar a tener un contenido de azufre a destacar.

#### CONTENIDO EN METANOL

El aumento de la concentración del mismo provoca un descenso del punto de inflamación, aparte de indicar una

disminución de la calidad. Si se sobrepasa los límites establecidos por la norma, deberá someterse a etapas de purificación.

#### CONTENIDO EN MONOGLICÉRIDOS, DIGLICÉRIDOS Y TRIGLICÉRIDOS

Su existencia muestra que durante la reacción de transesterificación se ha obtenido una conversión baja. A medida que aumenta el contenido de acilglicéridos, se incrementa el punto de congelamiento y el punto de nube. Aunque lo más común es el contenido de monoglicéridos, que provocan un pequeño incremento de la viscosidad.

#### CONTENIDO EN GLICERINA LIBRE Y TOTAL

La glicerina libre es aquella que presenta el biocarburoante tras haber realizado las etapas de purificación y separación. La glicerina total hace alusión a la suma de esta primera más los acilglicéridos (-mono, -di y -tri) resultantes en el biodiésel. Si presenta un valor de glicerina total alto, es equivalente de una mala reacción.

#### INFLUENCIA DE BAJAS TEMPERATURAS

A bajas temperaturas, todos los carburantes procedentes del diésel, presentan problemas de cristalización de las parafinas de grandes pesos moleculares. Al ocurrir esto, se comienzan a crear unos núcleos muy pequeños de un compuesto parecido a la “cera” en la fase líquido de las parafinas de pequeños pesos moleculares. Al aumentar la cantidad de precipitados, pueden formarse problemas mecánicos en el motor. Hay dos parámetros para cuantificar la probabilidad de inicio de una posible solidificación o precipitación parcial del biocombustible y a qué temperaturas podría ocurrir ese suceso:

- **Punto de niebla o ensuciamiento (*Cloud Point*):** temperatura a la cual los cristales son visibles al ojo humano debido a la precipitación de ceras, y se da cuando se alcanza un diámetro superior a 0.5 diámetro superior a 0.5  $\mu\text{m}$ .
- **Punto de fluidez (*Pour Point*):** temperatura a la que un líquido pierde sus características como fluidos. Si se supera esta temperatura hay una gran probabilidad de que aparezca la aparición de problemas y el riesgo de oclusión de los filtros. Un elevado punto de congelación equivale a un contenido de parafinas considerable.

## 4 MATERIAS PRIMAS

---

La elección de la materia prima para la producción del biodiésel es un factor muy importante, pues la determinación de una u otra constituirá la calidad del y el método de producción a seguir para la obtención del biodiésel. Además, especificará los beneficios que se obtengan ya que la adquisición de la materia prima, como se ha mencionado anteriormente, supone buena parte del coste final.

Una de las características más importantes que ha de poseer la materia prima es el índice de acidez y el índice de yodo, los cuales se explicaron anteriormente, ya que estos serán heredados tras la reacción de transesterificación en los ésteres alquílicos.

Generalmente, se podría garantizar que la más utilizada para la producción del biodiésel en todo el mundo es el aceite refinado vegetal. No obstante, pese a que sea la más utilizada, nos podemos encontrar un extenso rango con diferente origen. La determinación dependerá de los recursos que haya disponible en el país correspondiente y del precio al que se logre conseguirlo.

Los aceites vegetales proceden de plantas oleaginosas y existe mucha polémica con aquellos que sirven también para la alimentación del ser humano, aunque no impide que, en ciertos lugares, ya sea por una alta disponibilidad o excedentes de ciertas cosechas de vegetales, se pueda utilizar para la producción del biodiésel como materia prima, y por consiguiente se incluya en esta clasificación.

### 4.1. ACEITES VEGETALES CONVENCIONALES

Se les llama así debido a que son los aceites que desde siempre se han destinado al consumo del ser humano. Son la materia prima que más se ha utilizado durante los últimos años gracias a su gran implantación en la mayoría de

países, aunque actualmente se encuentran en un estado de preocupación y se apoya a utilizar unas materias primas más sostenibles que no comprometan los cultivos originados para la alimentación. Podemos encontrar los siguientes:

- **Aceite de colza:** esta materia prima es la más utilizada para la producción de biodiésel en la UE. Se caracteriza por el alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados y los escasos niveles de ácidos grasos poliinsaturados y saturados. Dichas características hacen que sea realmente bueno debido a su estabilidad química y su comportamiento a bajas temperaturas

Aunque, debido a la menor oferta y el aumento de precio consiguiente de la materia prima, se ha reducido su participación de un 48% a un 44% entre 2016 y 2017. El aumento de las competencias de las materias primas que son más baratas provenientes de fuera de la UE, junto con la escasez de aceite de colza ha disminuido las oportunidades de las semillas oleaginosas propias de la UE.

A pesar de que se incluya aquí, cada vez se emplea menos para la alimentación humana.

- **Aceite de girasol:** se caracteriza por su elevado contenido de ácido linoleico y, debido a modificaciones genéticas se consiguió la obtención de un aceite de girasol con un elevado contenido en ácido oleico y con distribución de ácidos grasos, lo que produce mejoras en el biodiésel resultante y muchas ventajas respecto al aceite de colza.

Se emplea en zonas con un clima templado debido a sus características de cultivo y, aunque tiene un enorme uso en alimentación, es una de las materias primas más utilizadas para la fabricación del biodiésel en Europa.

- **Aceite de palma:** se caracteriza por su alto contenido de ácidos grasos saturados (cerca del 50%), siendo mayoritariamente el ácido oleico y palmítico. Esto, junto con su elevado contenido de estabilizantes naturales, son los responsables de que este aceite posea una mayor estabilidad química que los demás aceites convencionales.

En ciertos países como España, Italia y Países Bajos, es aceite de palma importado es una de las principales materias primas para la obtención de biodiésel.

- **Aceite de soja:** este aceite tiene muy buena proporción de los ácidos grasos insaturados, especialmente de ácido linoleico (55% aproximadamente).

Se emplea habitualmente en la mayor parte de América gracias a la alta producción en EEUU y Alemania.

- **Aceite de coco:** tiene una alta temperatura de gelificación (22-25°C), una elevada viscosidad y una mínima temperatura de cámara de combustión (500°C). A parte, su contenido de grasas saturadas es cerca del 90% y es muy resistente a la oxidación.

Se utiliza principalmente en Filipinas y, también se usa en productos cosméticos y para la cocina.

Otros aceites menos utilizados pero que se emplean en otras zonas son el aceite de oliva, de maíz, de higuera y el derivado de las semillas de algodón.

La principal ventaja de los aceites vegetales convencionales es la facilidad de producción de los mismos en

diferentes países. Aunque su inconveniente principal es la competencia que tienen en el mercado alimentario, pudiendo disminuir la cantidad de estos aceites e incrementando su precio.

## 4.2. ACEITES VEGETALES ALTERNATIVOS

Estos aceites vegetales son aquellos que no se utilizan para el consumo humano y, por tanto, no compiten con los cultivos que se destinan a ello. Dichos aceites suelen tener asociados menores costes de producción y una mayor disponibilidad.

Una oleaginosa perfecta para la elaboración del biodiésel debe caracterizarse por una gran disponibilidad regional, gran adaptabilidad climática a la región donde se cultive, bajo contenido de ácidos grasos libres, alto contenido de aceite, bajas necesidades agrícolas, compatibilidad con la estructura existente en el campo, la habilidad de crecer en unas tierras no gratas para la agricultura y fuera de temporada de los cultivos tradicionales, y un mercado potencial para subproductos.

Dichas características junto con el interés de las materias primas que no compitan en el mercado de la alimentación han promovido la idea de utilizar los aceites que provienen de cultivos energéticos como *Camelina sativa*, *Crambe abyssinica* y *Pongamia pinnata*.

Se incluyen en este punto el salvado de arroz, planta de caucho (*Hevea brasiliensis*), aceite de linaza y el aceite de ricino. Presenta también un gran interés el aceite de *Jatropha* (*Jatropha curcas*) que lo concierten en un gran candidato para la producción del biodiésel gracias a su resistencia, porcentaje de aceite y a su elevada tasa de crecimiento.

Sin embargo, existen otros cultivos como el de *Brassica carinata* y la *Cynara cardunculus* que se adaptan mejor a las condiciones de nuestro país y producen un rendimiento mayor. Esta primera presenta una alternativa real al regadío extensivo y al secano. La segunda opción es un cultivo permanente y plurianual, de una ocupación del terreno de unos 10 años aproximadamente, y fundamentalmente está enfocado a la producción de biomasa, sin embargo, también se puede aprovechar sus semillas para la producción de aceite. Se obtienen alrededor de 3000 kg de semillas de las cuales su aceite irá destinado a la producción de biodiésel.

## 4.3. ACEITES DE FRITURA USADOS (WCO)

Actualmente, se considera una de las materias primas con mejores perspectivas para la elaboración de biodiésel. Pese a la gran ventaja que conlleva su utilización al estar evitando su proceso de reciclado como residuo y los costes que esto conlleva, presenta ciertas desventajas como materia prima para la producción de biodiésel.

Puesto que es un tipo de aceite utilizado varias veces para cocinar, aparecen algunos cambios en su composición química y física. De forma general, se produce un incremento en la viscosidad, diferente valor de tensión superficial y calor específico, y también presenta una modificación en el color. Aunque las desventajas más importantes son su alto contenido de agua (provoca hidrólisis), ácidos grasos libres (provoca saponificación) y ciertas impurezas sólidas. Y todas ellas aminoran el rendimiento del proceso de transesterificación y hacen indispensable un pretratamiento del aceite antes de comenzar el proceso.

También, suele presentar un descenso de la estabilidad a la oxidación, por lo que no cumple con los requisitos de la norma UNE14214 y exige agregar antioxidantes.

## 4.4. GRASAS ANIMALES

Estas grasas se sitúan debajo de los tejidos de los animales y están compuestas por una mezcla de glicerina, ácidos grasos y pequeñas cantidades de otros compuestos. Pese a que no son tan considerablemente usadas como sus homólogas vegetales debido a las características naturales que la hacen menos adecuadas, pueden llegar a ser una alternativa para la producción de biodiésel.

Mientras que en los aceites vegetales los ácidos grasos que priman son el linoleico y el oleico, las grasas animales contienen un contenido mayor de ácido graso esteárico y palmítico. Por ejemplo, la manteca de cerdo es más rica

en ácidos grasos saturados que la grasa de pollo, siendo estas proporciones de ácidos grasos iguales o mejores que las que contiene el aceite de palma.

Su utilización contempla las necesidades de hallar una materia prima a bajo coste. Estas grasas son más baratas que los aceites vegetales y la principal ventaja es que se usan los residuos de restauración, y grasas animales sobrantes de la industria cárnica, mercados y mataderos. Aunque debido a esto, su disponibilidad en el mercado está más limitada al tratarse de subproductos de esta industria.

En vista de esto, en la actualidad existe una pequeña cantidad de estudios dedicados a la producción de biodiésel a partir de las grasas animales.

Las más destacables son:

- Grasa vacuna
- Grasa procedente de pollos
- Grasa procedente de cerdos
- Aceite de pescado

## 4.5. ALGAS

Las algas suponen una excelente alternativa como materia prima para la producción de biodiésel al poseer un elevado contenido de aceite y, además de una alta tasa de crecimiento, son capaces de desarrollarse en cualquier ambiente que posea luz solar.

Otras ventajas de esta materia prima son que este biofuel es más ecológico al requerir menos área superficial con respecto a los cultivos convencionales, algunas algas oleaginosas se pueden cultivar en agua de mar o agua salobre (incluso en fotobiorreactores en laboratorios), son extraordinarias capturando CO<sub>2</sub> y el biodiésel obtenido es uno de los pocos combustibles con emisiones negativas de CO<sub>2</sub>.

Como principal desventaja cabe destacar el coste algo elevado correspondiente a la extracción del aceite.

## 4.6. OTRAS FUENTES

Pueden emplearse otras materias primas para la producción del biodiésel, por ejemplo, posos de café debido a su contenido líquido, los fangos activos de una estación depuradora de aguas residuales y algunos procesos de microorganismos como bacterias y hongos.

## 4.7. DIFERENCIAS ENTRE MATERIAS PRIMAS

Respecto a las diferencias a destacar entre las materias primas, se podrían señalar las siguientes:

A. **Contenido en ácidos grasos libres:** este parámetro condiciona el proceso, principalmente en sus primeras etapas. Por eso, las diferentes materias primas destinadas a la producción del biodiésel se podrían clasificar en tres grupos dependiendo del contenido en ácidos grasos libres (FFA):

- Aceites refinados, como el de colza, girasol o soja (FFA<1.5%)
- Aceites usados, aceites de palma, aceite de coco o grasas animales de bajo contenido en FFA (FFA>4%)
- Grasas animales con alto contenido en FFA (FFA>20%)

En referencia al refinado del aceite se comenta la contradicción de poseer un elevado contenido en FFA, puesto que su expulsión por un proceso fácil de reacción con un hidróxido significa pérdidas del aceite crudo, lo cual supone una bajada del rendimiento del proceso.



Debido a esto, desde la perspectiva de las etapas del proceso, una planta diseñada para operar con aceite de colza lo haría de la misma forma para operar con el aceite de soja o girasol, variando la dosificación de reactivos pertinentes, pero sin modificaciones estructurales.

Aunque, en el caso de querer tratar en la misma planta otros aceites como los de palma, coco o los derivados de grasas animales, se necesitarían otras etapas previas de disminución de los FFA.

**B. Cultivos para producir biodiésel:** requieren más suelo para obtener la misma cantidad de energía o carburante.

**C. Características:** hay ciertos aspectos de la materia prima que se va a utilizar que deben tenerse en cuenta debido a que influirán mucho en su eficiencia y en el proceso:

- Los componentes más básicos del biodiésel son los triglicéridos, que derivan tanto de ácidos grasos insaturados como saturados. A través del índice de refracción y el de yodo se determina el grado de insaturación. En el aceite de palma el grado es saturado (índice de yodo bajo), mientras que en el de colza, soja y girasol los grados son saturados.
- La materia contenida en los aceites que no sea triglicéridos, ácidos grasos libres o materia grasa se le conoce con el nombre genérico de gomas, y se denomina sustancia insaponificable. Se suelen mantener en difícil solubilidad y en suspensión coloidal. Estas gomas se suelen tratar con un ácido con un color fosfórico y más tarde se neutraliza la acidez con sosa cáustica.
- La neutralización alcalina puede producir jabones. Dicho esto, el aceite más desaconsejable es el de palma, que se comercializa en ciertos casos con un 10% de ácidos grasos y debiendo estar en un 3%.
- Es importante que el aceite que se va a someter al proceso de transesterificación se encuentre libre de ácidos grasos libres, pues estos se combinan con el catalizador disminuyendo la eficiencia en el proceso. Además, también puede originar jabones.
- Otro inconveniente es la presencia de agua, que procede del etanol y no de los aceites. El agua provoca la formación de los jabones y biodiésel muy difícil de separar, y ocasiona también la dilución del catalizador. Por otro lado, la temperatura, el tiempo de almacenaje, la presencia de humedad y la acción enzimática tienden a estropear el aceite aumentando la acidez libre.

# BLOQUE III: JATROPHA CURCAS

---

## 1 INTRODUCCIÓN

---

Actualmente, la producción de biodiésel se considera una prioridad para llegar a conseguir un desarrollo global sostenible. Con este fin, se han desarrollado e investigado numerosas técnicas para elaborar biodiésel a partir de diferentes plantaciones energéticas.

Algunos estudios han demostrado que el biodiésel producido a través de las semillas de *Jatropha Curcas L.* contiene magníficas propiedades como combustible y puede llegar a ser usado en los motores que utilizan diésel.

La *Jatropha Curcas L.* (nombre científico), más conocida como la *Jatropha*, tiene un enorme potencial para la producción de biodiésel y se están efectuando grandes inversiones para su desarrollo e investigación. Esto se debe especialmente a características como su capacidad a tolerar la sequía llegando a sobrevivir en climas subtropicales y, por otra parte, a que no compite en el sector alimenticio a causa de su elevado grado de toxicidad, pues contiene un elevado contenido en ésteres de forbol. Por otro lado, al ser capaz de sobrevivir en suelos pobres, podría favorecer a la restauración de áreas erosionadas y a la recuperación de tierras. Asimismo, al no ser utilizada como alimento ni para las personas ni los animales, ejerce cierta importancia en la disuasión de ganado, ayudando a los cultivos y alimentos de valor alimentario o comercial.

El enorme interés en esta planta por parte de agricultores, organizaciones no gubernamentales e inversionistas se debe principalmente a su potencial como cultivo energético. Pues de sus semillas puede extraerse aceite con unas características ventajosas para la obtención de biodiésel y para la combustión en motores de encendido por compresión. También, este aceite puede ser usado de base para la elaboración de jabón.

## 2 ASPECTOS GENERALES

---

### 2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La *Jatropha Curcas* es un tipo pequeño de arbusto o árbol perenne y de crecimiento rápido que tiene un tiempo de vida de unos 50 años de promedio y puede llegar a crecer hasta los 6 metros de altura. Pertenece a la familia de las *Euphorbiaceae* y se conocen alrededor de 175 especies. Las hojas de la planta son verdes, ovadas y suaves, miden entre 10 y 25 cm de largo y entre 9 y 15 cm de ancho, y tienen entre 5 y 7 lóbulos. Desarrollan cinco raíces, una de ellas más profunda y las cuatro restantes más superficiales.



Ilustración 2.1.1. Árbol *Jatropha Curcas*

Esta planta florece en temporadas cálidas, durando las mismas hasta la temporada de lluvias. La *Jatropha Curcas* es monoica, tiene flores femeninas y masculinas en la misma planta y, de vez en cuando, con flores hermafroditas. Las flores masculinas son algo más corta que las femeninas.



Ilustración 2.1.2. Flor *Jatropha Curcas*

Cada inflorescencia se integra de un manojo que producirá los frutos, los cuales crecerán en la terminación de la rama compuestos de racimos de entre 5 y 20 unidades. Estos frutos son cápsulas ovoides de 1.5 cm a 3 cm cada uno. Se componen de una cáscara leñosa y dura que al principio es color verde y pasa a ser marrón oscuro cuando ha madurado, como podemos observar en la figura. Cada fruto guarda tres semillas en su interior.



Ilustración 2.1.3. Fruto *Jatropha Curcas*



Ilustración 2.1.4. Semilla *Jatropha Curcas*

El tamaño de la semilla varía entre las diferentes plantas de distintas procedencias e incluso dentro de la misma planta. Su peso oscila entre 0.5 y 0.8 gramos por semilla y tiene aproximadamente 1 cm de espesor, 1.8 cm de largo y 1.2 cm de ancho. La semilla consta de una cáscara dura y un grano suave y blanco en su interior, con un contenido de humedad del 7% aproximadamente y de entre 32 y 40% de aceite. En la siguiente figura se pueden observar las distintas partes de la planta.

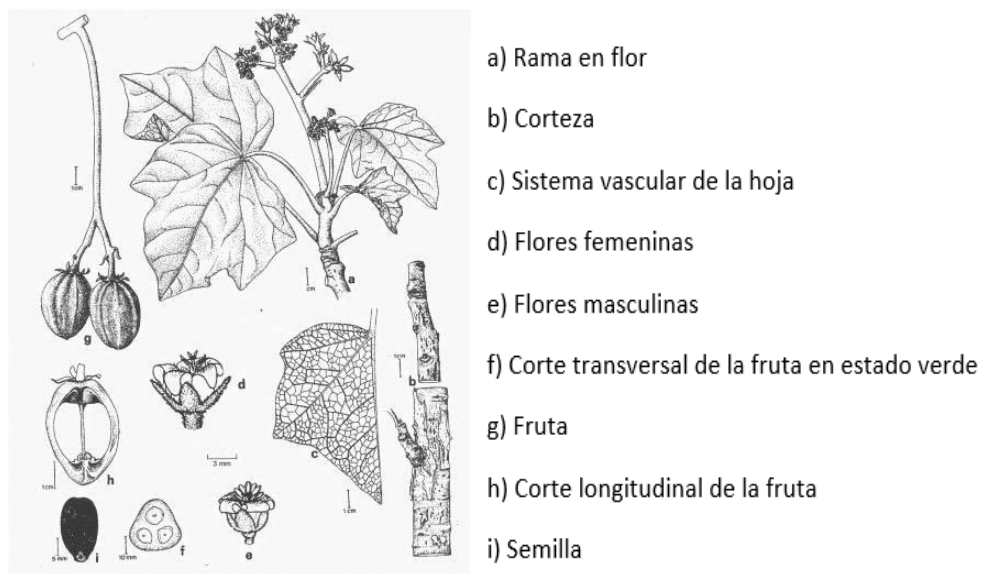


Ilustración 2.1.5. Diferentes partes de la planta de la *Jatropha Curcas*

## 2.2. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

La *Jatropha Curcas* tiene su origen en América del Sur y América central. Aunque, en el siglo XVI exploradores y navegantes la distribuyeron a otras regiones tropicales por todo el mundo. A causa de ello, esta planta crece por todo el mundo en zonas tropicales y subtropicales, como se puede observar en la siguiente figura.

Las mejores condiciones climatológicas para el cultivo de la *Jatropha Curcas* son temperaturas de 24°C de media anual y en climas tropicales y subtropicales como se ha mencionado anteriormente. Aunque, la planta puede sobrevivir a heladas leves y de escasa duración. Se desenvuelve en altitudes de hasta 1200 m sobre el nivel del mar y con precipitaciones pluviales entre 300 y 1200 mm de lluvia anuales. No obstante, dicha planta se puede cultivar en regiones áridas o semiáridas donde el contenido de aceite sea elevado.

## 2.3. ECOLOGÍA

Mucha gente cree que la *Jatropha Curcas* es una maleza. Sin embargo, no lo es al no propagarse por sí misma. Las semillas y los frutos son venenosas y, por lo tanto, los animales no las ingieren o transportan, por lo que no se propaga de forma natural.

Esta planta se puede adaptar a diferentes condiciones ecológicas debido a su gran resistencia. Contiene un mecanismo de supervivencia que la hace soportar períodos de estrés. Es capaz de guardar los nutrientes de las hojas en la raíz y el tallo y, cuando ocurre esto, las hojas se convierten en amarillas y se caen, aunque el tallo permanece de color verde y activo fotosintéticamente. Durante este estado, la *Jatropha* puede sobrevivir sin lluvia más de un año.

En ciertos casos, de forma natural, esta planta crea una relación de simbiosis con las micorrizas del suelo aumentando la capacidad de absorción de agua y nutrientes del suelo de la planta. Al haber micorrizas, se aumenta la tolerancia de las plantas a niveles bajos de nutrientes y a la sequía. Dicha simbiosis se produce de forma natural, aunque nunca en plantaciones, a no ser que se induzca artificialmente.

## 2.4. USOS ACTUALES E HISTÓRICOS DE LA JATROPHA

La *Jatropha Curcas* se utiliza con diversos fines desde la antigüedad hasta la sociedad actual. Sus hojas al igual que el látex que posee la planta pueden ser usados para combatir ciertas enfermedades, pues al ser antimicrobiana y anticancerígena, su uso para los animales y el ser humano es indiscutible.

Por eso, es conveniente seguir con los estudios hacia dicha planta, los cuales se vienen efectuando desde hace más de dos siglos.

En ciertos lugares se utiliza como cerca natural, al ser más económico que instalar cercas de alambres, ya que, al ser tóxico para el ganado y otros herbívoros, divide cualquier espacio de manera brillante.

El empleo de esta planta se relaciona con la prevención de la erosión del suelo, producción de jabones y, sobre todo, para la obtención de aceites para diferentes usos.

Se han realizado varios estudios debido a la alta resistencia de la *Jatropha Curcas* a las plagas, produciendo gran variedad de plaguicidas e insecticidas, sobre todo para uso veterinario.

Esta planta posee la característica de regular el crecimiento de la maleza y, por eso, se suele plantar junto a cultivos alimenticios.

Otro uso de la *Jatropha* es la producción de barnices y tintes para uso industrial. Actualmente, se colocan cerca de las colmenas al tener un beneficio conjunto, incrementando la cantidad obtenida de miel al aumentar la producción de frutos por consecuencia de la polinización de las abejas.

Muchas personas han utilizado el aceite de esta planta para usarlos en lámparas de aceite, puesto que no genera humo.

En la siguiente figura se puede observar un esquema más detallado de los diversos usos de las diferentes partes de la planta.

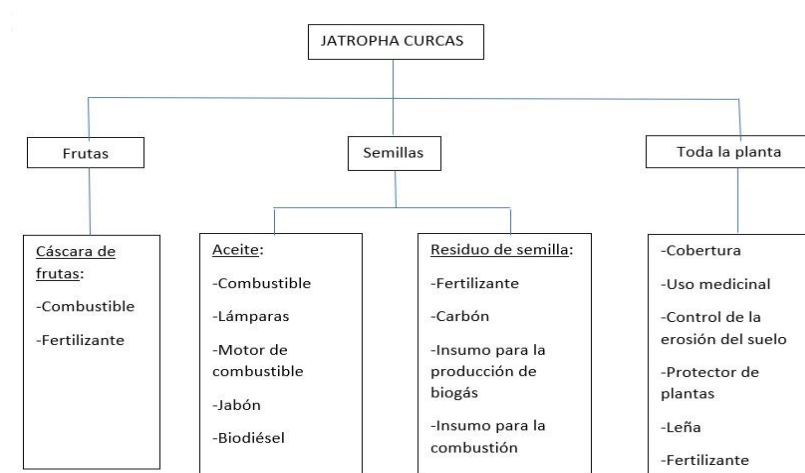


Ilustración 2.4. Esquema con los diversos usos de las diferentes partes de la planta de la *Jatropha curcas*

## 2.5. COMPOSICIÓN DE LA SEMILLA

Las semillas de la *Jatropha Curcas* no son comestible debido al contenido de componentes tóxicos como fitatos, ésteres de forbol, inhibidores de tripsina, curcin y lectinas. La cáscara de las semillas representa el 37% del peso total aproximadamente, siendo lo restante del grano. El aceite se encuentra en el interior de la semilla principalmente, teniendo entre un 32 y 42% del mismo.

Según un estudio respecto a la composición de la semilla blanca procedente de 18 tipos de *Jatropha*, se encuentran grandes modificaciones en los contenidos en lípidos, fibra, proteína y cenizas entre la semilla y la cáscara de la misma, como se puede ver en la siguiente figura.

COMPONENTE (% PESO)	SEMILLA BLANCA	CÁSCARA
Lípidos	43-59	1.17-1.4
Proteínas	19-34.5	4.37-4.5
Ceniza	3.4-5	4.93-6.1
Fibra neutra	3.5-6.1	85.8-86.64
Fibra ácida	2.4-3.9	75.59-75.6
Lignina	0.18-0.3	47.5-51.13
Energía	28.5-31.2	19.3-19.5

Tabla 2.5. Composición de la semilla de la *Jatropha curcas*

A causa de la alta toxicidad de la planta, para su uso con fines médicos es necesario eliminar sus componentes tóxicos. Primeramente, se evaluó el tratamiento térmico, pero finalmente se descartó debido a la alta estabilidad de los ésteres de forbol a elevadas temperaturas. Un procedimiento con radiación ionizante podría ser práctico para acabar o inhibir ésteres de forbol, fitatos o lecitinas.

## 2.6. FICHA TÉCNICA DE LA JATROPA

PARÁMETRO	UNIDAD	MÍNIMO	PROMEDIO	MÁXIMO
Rendimiento de la semilla	Tonelada seca/hectárea	0.3	1.5	6
Requerimiento de lluvia para la producción de semillas	Milímetros/año	600	1000	1500
Contenido de aceite de semillas	% de la masa	-	34	40
Rendimiento de aceite después de prensarlo	% de la masa de semillas de insumo	-	34	40
Contenido energético por kilogramo de aceite	MJ/kg		37	

Tabla 2.6. Ficha técnica de la *jatropha*

## 2.7. TÉCNICAS DE CULTIVO

Se puede realizar de tres formas:

- **Plantación a partir de granos:** se siembran los granos sanos en hoyos con dos granos en cada uno, los cuales comienzan a germinar en la primera semana. Se hacen líneas con una separación de dos metros entre cada planta en cada línea, con una distancia de 2.5-3 metros entre cada línea.

Si se tiene una separación de 2.5 metros entre las líneas, habrá una densidad de 2000 plantas por hectárea. Aunque, si se mantiene una distancia de 3 metros, la densidad será de 1650 plantas por hectárea, pero tendrá una ventaja a la hora de cosechar.



Ilustración 2.7.1. Semilla *Jatropha curcas* para plantación a partir de granos

- **Plantación a partir de platinos:** se siembran en paquetes de plástico en la tierra. Se tiene que regar cada dos días y comienza a germinar a partir de la primera semana.

Los platinos estarán en las bolsas de plástico dos meses hasta que se trasplante a la tierra de la misma forma que con los granos.



Ilustración 2.7.2. Planta *Jatropha curcas* para plantación a partir de platinos

- **Plantación a partir de brotes:** se corta una rama de unos 40-50 centímetros de un árbol de *Jatropha* y se deja secar durante un día para que expulse el líquido sobrante.

Se plantan los brotes en hoyos de unos 15-20 centímetros de profundidad, siendo la densidad de plantas por hectárea igual a la plantación a partir de granos.



Ilustración 2.7.3. Planta *jatropha curcas* para plantación a partir de brotes

No obstante, se puede combinar la plantación de la *Jatropha* con diferentes cultivos como maíz, cacahuets, pimientos, tomates... Para ello, se siembran entre las líneas de las plantas de *Jatropha*. Aunque, por precaución, sólo se podrá realizar durante el primer año.

## 2.8. ANÁLISIS DEL CULTIVO Y DESARROLLO DE PLANTACIONES DE JATROPHA CURCAS

La plantación de la *Jatropha* a gran escala con la finalidad de obtener biodiésel en países con las condiciones climatológicas acertadas tiene un gran potencial. No obstante, el principal inconveniente para el progreso de estos proyectos viene a ser que los análisis de costes y beneficios y los escasos informes que hay se encuentran incompletos y son muy distintos entre ellos.

Por ello, es conveniente tomar ciertas medidas para que el cultivo de esta planta sea viable económicamente para los pequeños productores:

- Reducir los costes de operación de las plantaciones.
- Realizar un proceso de revalorización para los subproductos.
- Incrementar la producción de las semillas en una cifra superior a las 2-2.5 t/ha/año.

Generalmente, los proyectos elaborados se han programado para un corto plazo, lo que ocasiona que las plantaciones no sean viables. Se necesita desarrollar una planificación a medio o largo plazo.

Por otra parte, en los países menos desarrollados el precio de los combustibles fósiles es más barato, lo que provoca que el biodiésel en muchos casos no sea competitivo en el mercado.

El impacto sobre el medioambiente que provocan las plantaciones de la *Jatropha* cambia mucho según sus características y localizaciones. Para el caso de los cultivos energéticos, el biodiésel obtenido a partir de esta



planta emite una cantidad menor de GEI que los combustibles fósiles.

No obstante, la mayoría de los análisis sobre el impacto al medioambiente solo estiman la emisión de GEI y el consumo y producción de energía. Se ha estudiado que las plantaciones de la *Jatropha* pueden reducir la biodiversidad y alterar el ciclo de los nutrientes de los ecosistemas al deforestarse determinadas localizaciones con el fin de plantar *Jatropha*. Aunque, si dichas plantaciones se ubican en zonas donde no es necesaria la deforestación, esta planta puede resultar una ayuda para ampliar la biodiversidad y recobrar las características perdidas del suelo. Por otra parte, aunque la *Jatropha* sea una planta tóxica y, por lo tanto, la producción de biocombustible no compite estrictamente con la industria alimenticia, sus cultivos pueden ocupar zonas derivadas al cultivo de productos alimenticios.

El cultivo de la *Jatropha* puede incrementar el desarrollo social de una región y mejorar y crear empleo, aunque, para ello habría que reducir los riesgos a los pequeños productores e incrementar la viabilidad económica de los proyectos.

## 3 EXTRACCIÓN DEL ACEITE

---

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Principalmente, la razón del estudio y desarrollo de diversas técnicas de extracción del aceite de las semillas es la necesidad de disminuir el proceso de obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales. Otra característica de estos progresos es la mejora de técnicas de extracción más considerables con el medioambiente.

Generalmente existen dos formas para la extracción del aceite de la planta: mecánica y por solvente. La primera extracción utiliza una prensa o alguna máquina de presión para sacar el aceite de las semillas. La extracción por solvente o química consiste en la extracción sólido líquido con un solvente. En la actualidad se está estudiando el empleo de ultrasonidos y enzimas para la extracción. También se está investigando técnicas de extracción por solvente en condiciones supercríticas.

La extracción mecánica consigue recuperar alrededor del 90-95% del aceite contenido en las semillas y, mediante la extracción por solvente, se puede recuperar hasta el 99% del aceite de las semillas. Aunque, a menudo, en fábricas industriales de aceite, se combinan los dos procesos para obtener rendimientos mayores.

### 3.2. EXTRACCIÓN QUÍMICA O POR SOLVENTE

Este método se basa en una extracción sólido-líquido en la cual el aceite se convierte a través de la difusión en un solvente.

La extracción por solvente es una de las técnicas de separación más usadas en laboratorios químicos. El propósito principal consiste en separar individualmente un compuesto desde una mezcla líquida o sólida con otros compuestos hacia una fase líquida. La eficacia de esta técnica se basa en la diferencia de solubilidad en el disolvente de la extracción entre la sustancia deseada y las demás sustancias existentes en la mezcla inicial.

El primer paso antes de comenzar la extracción por solvente sería pelar las semillas. También deben someterse a un proceso de secado para suprimir toda la humedad posible antes de poder proceder con la extracción.

En este tipo de extracción, los solventes más empleados son los orgánicos como el ciclohexano, el benceno, el hexano o la acetona. Aunque, estos compuestos son muy contaminantes y perjudiciales para la salud. Por ello, en los últimos años se han llevado a cabo diferentes técnicas de extracción con solventes más favorables con el

medioambiente y que no producen sustancias orgánicas volátiles, como las extracciones acuosas (AOE), extracciones acuosas en enzimas (AEOE), extracción en condiciones supercríticas o el empleo de ultrasonidos.

En la técnica de AEOE se emplean enzimas para extraer el aceite de las semillas. La ventaja principal es la reducción de los costes económicos y bajos niveles de contaminación. No obstante, esta técnica está muy restringida al tardar bastante tiempo las enzimas en liberar el aceite de las semillas.

La técnica de extracción en condiciones supercríticas se fundamenta en la capacidad de solubilidad del solvente cuando se halla en condiciones extremas. Debido a esto, se extrae un aceite con alta pureza. Asimismo, no utiliza solventes inflamables o tóxicos y su operación es muy sencilla.

### **3.3. EXTRACCIÓN MECÁNICA**

#### **3.3.1. LIMPIEZA Y CONTROL DE LAS SEMILLAS**

Realizar un control y limpieza a las semillas puede disminuir el riesgo de que la prensa sufra un deterioro. Gran parte de la contaminación consiste en piedras, pedazos de madera y arena, los cuales causan daño a la prensa. La forma más habitual para remover estas sustancias es mediante el empleo de un tamiz vibrador o una trilladora. La opción de usar el tamizado mecánico o manual dependerá del volumen de producción.

#### **3.3.2. PROCESO DE PENSADO**

En el proceso de prensado, se introducen las semillas en una tolva para posteriormente ser aplastadas y transportadas mediante un tornillo giratorio hacia una restricción o boquilla. Conforme se vaya llenando de semillas sueltas la sección de alimentación, el primer paso será el rodaje, la ruptura, la eliminación de aire entre los huecos del material y el desplazamiento de las semillas. En cuanto se eliminen dichos huecos, las semillas ceden ante la fuerza que se aplica mediante la deformación y el contacto mutuo.

El continuo transporte de semillas nuevas a través de la tolva hace que se incremente la presión hasta el nivel necesario que necesita la boquilla. En ese momento, la prensa estaría en marcha. Dicha presión ocasiona la extracción del aceite del material sólido que se encuentra dentro de la prensa.

#### **3.3.3. PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL PENSADO**

A la hora de instalar o diseñar una prensa para las semillas de esta planta es necesario conocer las variables más importantes que pueden afectar a la calidad y recuperación del aceite. La siguiente imagen detalla la influencia e impacto sobre las variables que se producen en el proceso de extracción en general, los cuales no podrían aplicarse a casos específicos.

PARÁMETROS DE PRENSADO		Recuperación de aceite	Presión	Temperatura	Capacidad (kg/hora)	Energía/litro
RPM	↓	↑	↑	-	↓	↑
Tamaño boquilla	↓	↑	↑	↑	-	↑
<b>TRATAMIENTOS DE LAS SEMILLAS</b>						
Calentado	↑	-	↓	↑	-	↓
Escamado		↓	-	↓	-	↓
Contenido de humedad	↓	↑	↑	↑	↓	↑
Contenido de cáscara	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Hervido		↑	↑	↑	-	↑

Tabla 3.3.3. Parámetros de prensado

Para dicha tabla, las flechas hacia arriba indican un incremento en esa variable, las flechas hacia abajo una reducción, las siglas “RPM” indican la velocidad de rotación del tornillo en revoluciones por minuto, el escamado es el corte del material en trozos más pequeños y el tamaño de la boquilla indica el orificio por donde sale el residuo del prensado.

### RECUPERACIÓN DEL ACEITE

Hay ciertos factores que influyen en la cantidad de aceite que puede ser extraído de las semillas:

- **Capacidad:** cantidad de semillas a procesar por hora (kg/hora). Cuanto mayor sea la capacidad, la recuperación del aceite por kg de semillas será menor a causa de la disminución del tiempo de prensado. Aunque, dicha capacidad podrá ajustarse modificando la velocidad de rotación del tornillo.
- **Punto de presión del aceite:** presión a la que empieza a salir el aceite de las semillas. Por ejemplo, si las semillas pueden ser manejadas de forma que se disminuya el punto de presión del aceite, este se extraerá más fácil.
- **Presión:** cuanto mayor sea la presión, mayor será la cantidad de aceite que se extraiga de las semillas. No obstante, a mayor presión, el aceite extraído tendrá más contenido de partículas sólidas, lo que conlleva a una limpieza más complicada. Las presiones para prensas movidas por un motor se encuentran en un rango de 50-150 bar.
- **Tamaño de la boquilla:** cuanto menor sea el tamaño de la boquilla, mayor será la presión y, por tanto, una producción de aceite mayor. El tamaño ideal de boquilla será diferente para cada prensa.
- **Contenido de humedad de las semillas:** se asocia con el almacenamiento. El contenido ideal de humedad será entre un 2 y 6%. Si el contenido de humedad supera el 8%, será demasiado húmedo y necesita mayor secado.
- **Contenido de cáscaras de semillas:** lo ideal sería prensar sin cáscaras las semillas. No obstante, el contenido de cáscaras es imprescindible para que se acumulen las presiones en el interior de la prensa. Al suprimirse el contenido de cáscaras, se necesita menos energía para el prensado y el producto es ninguna presencia de partículas o trozos de cáscaras en el aceite crudo. Sin embargo, al introducir las semillas sin

cáscaras, estas se transforman en una pasta en el interior de las prensas estándar y se queda pegada al tornillo interior manteniéndose girando a lo largo del mismo. En este caso, se necesita adaptar la prensa para incrementar la fricción en la cámara de prensado.

### CALIDAD DEL ACEITE

La calidad del aceite depende de ciertos factores:

- **Contenido de humedad de las semillas:** la cantidad de agua en aceite vegetal puro no debe ser superior del 0.08% conforme a las normas para combustible. Si se supera este valor podría incrementar la formación de ácidos grasos libres mientras se encuentre almacenada.
- **Temperatura del proceso:** la fricción en el interior de la prensa produce calor, que se transmite a los residuos del prensado y al aceite. Si se superan ciertas temperaturas se produce fósforo, lo que conlleva a depósitos de carbono en las cámaras de combustión y en los inyectores de combustible. La temperatura máxima de aceite durante el proceso todavía no se ha calculado con exactitud, aunque se considera que sea un valor aproximado al del aceite de colza (55-60°C)
- **Contenido de cáscaras de semillas:** unas presiones bajas conllevan a un contenido menor de cáscaras de semillas y, por lo tanto, un bajo contenido de residuos de cáscara en el aceite crudo.
- **Presión:** una presión elevada conlleva a una temperatura mayor y una presencia mayor de partículas sólidas en el aceite crudo.

## 4 TECNOLOGÍAS DE PRENSADO Y TIPOS DE PRENSA

---

De forma general, hay dos tipos de prensas: manuales (por ejemplo, la prensa RAM) y mecánicas (por ejemplo, la prensa de tornillo sin fin). Las prensas manuales serían más eficientes para capacidades pequeñas (1-10 kg de semillas por hora). Mientras que las prensas mecánicas son más adecuadas para capacidades más grandes (superior a 10 kg de semillas por hora).

Pueden hacerse diversas categorizaciones para los diferentes tipos de prensa:

- Operación por lotes (batch) vs Operación continua.
- Impulsadas por motor vs Impulsadas manualmente.
- Prensado frío vs prensado caliente.

Hay diferentes distinciones para los diferentes tipos de procesos que se encuentran en la industria del aceite. Primeramente, entre operación continua y por lotes. Gran parte de las prensas manuales trabajan por lotes. Las prensas RAM emplean la combinación de pistones y cilindros para aplastar las semillas y conseguir el aceite. El proceso de esta prensa no es muy complicado y puede realizarse manualmente. Por otra parte, las prensas mecánicas pueden trabajar de forma continua.

En países en desarrollo, tanto las prensas manuales como las mecánicas pequeñas con un motor de poca potencia son factibles, dependiendo de su aplicación y ubicación. Con las prensas manuales se puede producir aceite medicinal o jabón en cantidades bajas. Aunque, para el caso de biocombustible, son más recomendadas las prensas mecánicas.

La última distinción hace referencia a la temperatura en el prensado. Durante el proceso de prensado en frío, la temperatura del aceite no supera los 55-60°C. en el caso del prensado en caliente, se añade calor externo a la prensa o a las semillas pudiendo superar los 100°C la temperatura. A causa de las altas temperaturas y la fricción en la prensa mecánica, se exceden las temperaturas límites del prensado en frío. Por ello, para la extracción del aceite de *Jatropha* el uso del prensado en frío sería más eficiente, aunque debido a la elevada fricción que se produce en las prensas mecánicas, no es posible en ocasiones.

#### 4.1. PRENSAS RAM

El modelo más conocido de este tipo es la prensa RAM Bielenberg. Su inventor, Bielenberg, diseñó esta prensa aprovechando un diseño ya creado de una prensa RAM con un elevado costo y no muy ineficiente. Creó un modelo fácil de manejar, de mantenimiento local, durable y más barato. La mayor parte de estas máquinas han sido fabricadas en talleres locales de Tanzania, las cuales han tenido muy buena aceptación debido a su atractivo precio y a la calidad de las máquinas.

Originalmente, la prensa RAM Bielenberg fue fabricada para la prensa de semillas de girasol, aunque su uso se puede aplicar también a las de *Jatropha*, pero con una eficiencia menor. Tiene una capacidad de 2-3 kg/hora, una tasa de recuperación del aceite entre 70-80% y una densidad del aceite de 0.918 kg/litro, lo que implica menos de un litro a la hora.



Ilustración 4.1. Prensa RAM

#### 4.2. PRENSA DE TORNILLO

Este tipo de prensas, conocidas también como prensa “expellers”, separa el aceite de las partes sólidas a través del empleo de la presión. La mayoría de máquinas de prensado mecánico que hay en el mercado usan el procedimiento de prensado continuo. Habitualmente está compuesto de un tornillo sin fin que se encuentra girando a la vez que amasa y transporta las semillas introducidas a través de un embudo hasta una boquilla, lugar donde se acumula la presión. A través del largo del tornillo se va extrayendo el aceite que fluye desde los laterales del tornillo hacia un depósito. Las semillas son aplastadas y transformadas en tortas en su trayecto hacia la boquilla.

Nos encontramos con dos tipos de prensas de tornillo: prensa tipo “cilindro agujereado” y prensa tipo “filtro”.

##### PRENSA TIPO CILINDRO AGUJEREADO

También conocida como “cylinder-hole”, la salida en este tipo de prensa se realiza por medio de agujeros situados al final de la cámara cilíndrica de la prensa, como se puede ver en la figura de abajo. Las semillas perciben un incremento de compresión hacia la cabeza de la prensa. El aceite de las semillas se extrae junto a los orificios de salida y drena a lo largo de ellos. Consta de cavidades especiales situadas junto a la boquilla para evitar que la torta que forman las semillas se pegue al tornillo ya que, perjudicaría el movimiento si esto sucediese. La torta queda en forma de pellets al comprimirse por medio de las boquillas intercambiables.

En la mayoría de estas prensas, se calienta la boquilla para impedir que se forme un bloqueo con los residuos del prensado. La capacidad de estas prensas resulta bastante pequeña, hasta unos 200 kg/hora de semillas aproximadamente. Una característica muy provechosa de estas prensas es que, variando la velocidad de rotación del tornillo y el diámetro de la boquilla, se puede ajustar para usarla en varios tipos de semillas oleaginosas.

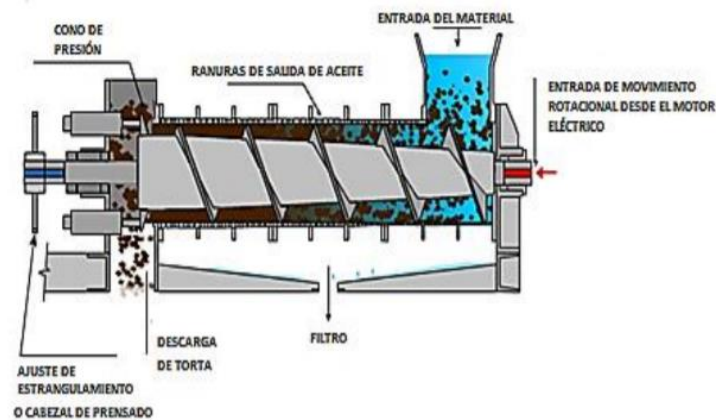


Ilustración 4.2.1. Prensa tipo cilindro agujereado

### PRENSA TIPO FILTRO

Conocidas también como “strainer press”, este tipo de prensas tiene un filtro de salida del aceite a lo largo de la cámara de la prensa que realiza la función de un colador. El filtro verdaderamente es una jaula cilíndrica que se compone de anillos verticales y barras horizontales que se sitúan de forma que dejan pocos espacios entre ellos. Esta separación puede ser fija o ajustable. Este tipo de prensas consta de un diseño con diferentes tornillos, cuyo diámetro se incrementa paulatinamente hacia la salida, acumulando así la presión sobre la sustancia sólida. El tornillo de compresión continua consta de una única pieza. Para ciertos tipos de semillas, la recuperación del aceite aumenta después de algunos pasos en una compresión múltiple. Un tornillo que tiene varias secciones puede emplearse para elaborar algunas etapas de compresión y así incrementar la cantidad de aceite recuperado. Aunque, para una mejor flexibilidad, consta de subsecciones con diferentes formas y tamaños.

En el transcurso de las semillas en la prensa, el aceite se va derramando por el filtro o colador. Se puede ajustar el regulador de presión para modificar el nivel o distribución de la presión. Para usar esta prensa con diferentes tipos de semillas oleaginosas sería necesario cambiar la distancia que hay entre las barras y los anillos del filtro por donde sale el aceite y así conseguir una mayor eficiencia y pureza de aceite vegetal. En cuyo caso, además, se deberá reajustar el regulador de presión y la velocidad de rotación. Este tipo de prensas se encuentran desde un rango de capacidades de 15 kg/hora de semillas hasta 10 toneladas/hora de semillas.



#### Ilustración 4.2.2. Prensa tipo filtro

Aunque para ciertos tipos de semillas no importe qué tipo de prensa usar, si una prensa tipo cilindro agujereado o tipo filtro, para la semilla de *Jatropha* sí importa. A través de varios estudios se llegó a la conclusión de que la prensa tipo filtro es preferible a la hora de extracción del aceite de la planta de *Jatropha Curcas*. En la siguiente tabla se puede ver una comparación cualitativa entre los dos tipos de prensa con respecto al uso para la *Jatropha*.

	PRENSA TIPO CILINDRO AGUJERADO	PRENSA TIPO FILTRO
Capacidad	-	++
Facilidad de mantenimiento	+/-	+/--
Precio	+/-	+
Rendimiento del aceite	++	+
Robustez	+/-	+
Facilidad de operación	-	+
Resistencia al desgaste	-	+

Tabla 4.2. Comparativa entre prensa tipo cilindro agujereado y tipo filtro respecto al uso para la *Jatropha*

### 4.3. POTENCIA REQUERIDA

Para la extracción del aceite en prensas pequeñas tipo RAM Bielenberg, ésta puede ser activada manualmente por uno o varios trabajadores. Tiene una capacidad de unos 3-5 kg de semilla por hora y un consumo de energía de 0.85 kWh/litro.

Para prensas con una capacidad mayor como son las de tornillo, se necesita un motor para poder accionarlas. Generalmente, se utilizan motores eléctricos debido a su bajo coste y a su facilidad de instalación, acoplamiento y funcionamiento. Aunque, es posible que se acople la prensa a un motor diésel directamente para que la activación no dependa de la red de energía eléctrica. Además, el aceite de la *Jatropha* extraído por la misma prensa puede servir para alimentar el motor diésel. Este tipo tiene un consumo de 0.30 kWh/litro.

Por tanto, en lo que respecta a la eficiencia energética, el uso de prensas con motores diésel es preferible a las prensas con un accionamiento manual.

## 5 PURIFICACIÓN DEL ACEITE VEGETAL

En este apartado se mostrará de forma general las diferentes tecnologías para la limpieza del aceite crudo de esta planta. El aceite crudo es el que se extrae directamente al prensar las semillas de la *Jatropha*. Este aceite contiene abundantes cantidades de material sólido que requiere removerse. Los sólidos pueden separarse por filtración (se separan de forma mecánica basándose en la dimensión de la partícula) o por sedimentación o centrifugación (usando la gravedad específica). Aunque, dentro de un mismo proceso pueden emplearse ambos principios de separación.

Al salir de la prensa, el aceite crudo contiene entre un 5 y un 15% de sólidos en peso, lo que equivale entre un 10 y un 30% en volumen. Por otro lado, se precisará un tratamiento posterior dependiendo de la aplicación prevista del aceite y de las circunstancias del prensado. Por ejemplo, los requisitos de calidad a la hora de producir biodiésel son más rigurosos que al utilizar el aceite para la producción de combustible para lámparas o jabones. En su mayor parte, el aceite elaborado por presión en frío no necesita de neutralización ni desgomado. No obstante, las prensas utilizadas para la planta de la *Jatropha* parecen funcionar a temperaturas más elevadas que

aquellas que se utilizan para el prensado la colza.

A la hora de producción de biocombustible, la limpieza del aceite es un proceso muy importante. Antes de poder usarse en un motor diésel, este aceite tiene que estar libre de partículas superiores a  $5 \mu\text{m}^4$  (micrón) para impedir la obstaculización de los filtros de combustible. Generalmente, los filtros de un motor diésel tienen un tamaño de entre 5 y 10 micrón.

## 5.1. IMPUREZAS EN EL ACEITE

El aceite crudo de esta planta contiene bastantes impurezas, las cuales se componen de partículas disueltas y en suspensión que no pertenecen a la estructura del aceite. Para que el aceite esté preparado para su uso en motores, deben eliminarse tanto los ácidos grasos libres, el fósforo y las partículas sólidas. Esta eliminación de las impurezas también es necesaria para impedir que se estropee el aceite durante el almacenamiento.

## 5.2. SEDIMENTACIÓN

Es el método más sencillo y económico de limpieza que trabaja a través de la gravedad de la tierra: depositando los sólidos en el fondo del tanque. Dicho método se recomienda sólo en procesos pequeños. La sedimentación es una solución apropiada para niveles de producción menores a los 50 litros/hora debido a su bajo costo, pues las pérdidas de eficiencia son menos significativas y se necesita poca tecnología cuando se trabaja en volúmenes reducidos. Este proceso sólo requiere un tanque de almacenamiento para retener el aceite durante una semana aproximadamente, por lo que se considera un proceso de limpieza barato.

El principal inconveniente de un sistema de sedimentación es el problema para la eliminación de partículas con tamaños igual o menores a 8 micrón, pues para lograrlo se necesitaría un filtro de seguridad.

## 5.3. FILTRACIÓN

La filtración tiene el principio básico de bloquear aquellas partículas que son más grandes que los poros de una membrana. Una manera muy fácil de filtrar sería usando una tela, aunque, una apreciación a tener en cuenta sería que no todos los tejidos tienen el mismo tamaño de poro. A parte, la capacidad nominal o de absorción de las partículas también es diferente según el tipo de material. Otra característica del filtrado sería su eficiencia a menor viscosidad del aceite, por lo tanto, a  $40\text{-}55^\circ\text{C}$  sería la temperatura óptima.

## 5.4. MÉTODOS DE FILTRADO

A continuación, se muestran los cinco tipos de filtrado más comunes.

### FILTROS DE GRAVEDAD

Es una solución muy simple que podría realizarse manualmente. Utiliza bolsas de tela o material especial. Es un método que no precisa mucha maquinaria o electricidad.

El mantenimiento en este proceso incluye la limpieza constante de la tela o bolsa de filtro. Es aconsejable dejar durante 4-7 días antes del filtrado el aceite para que se asiente y así prevenir los intervalos de cambio de la tela de filtro, aunque sean muy pequeños. En función de lo limpio que se encuentre el aceite después de la



sedimentación, la filtración por este proceso llevaría unos 10-30 minutos por cada 20 litros.

### FILTRO DE BANDA

Consiste en utilizar tela de vestimenta en un rollo para construir un filtro de tela movable. Los factores principales para este tipo de filtro son: utilizar el área total del filtro, calidad permanente gracia al empleo de la fuerza gravitatoria de la separación y erradicar de forma constante los sedimentos sin cesar el proceso de filtración. Al usar la tela movable del filtro, ayudamos a disminuir los problemas de obstrucción y proporciona una limpieza más sencilla. Este modelo posee una capacidad de 20-60 litros/hora por cada tela de filtro con un tamaño de poros de 5 micras.

### FILTRO DE PLACA

Se trata de un proceso que utiliza una serie de filtros en placas o láminas forradas con tela de filtro. Esta tela se puede usar varias veces antes de limpiarla. Al presionarse las láminas entre sí, se forman cavidades entre ellas. Al aplicarse una presión hidráulica y de bombeo sobre las placas, el aceite es obligado a pasar mediante la tela y los sólidos permanecen en las cavidades. El aceite sigue corriendo por medio del filtro hasta que los sólidos llenen las cavidades. Las láminas se separan y los sólidos se caen.

### FILTRO DE HOJA PRESURIZADO

Se compone de un recipiente de forma cilíndrico que se encuentra lleno de láminas filtrantes. De forma parecida al filtro de placa, este filtro guarda una capa de partículas en operación a un circuito cerrado.

El aceite crudo entra en el filtro y sólo puede correr mediante el marco que rodea las láminas de filtrado. Lo primero que debe hacer el aceite para entrar en el marco hueco sería pasar a través de las placas de filtro para que las partículas sólidas queden atrapadas. Así, cuando se encuentre lleno el filtro se aplicará una presión sobre el sistema mediante bombas a 10-15 bar, posteriormente el aceite empieza a correr y los sólidos del aceite forman una capa en la placa del filtro. Esta placa realiza la función de filtro.

### FILTRO DE BOLSAS

Estos filtros se basan en los mismos principios que los anteriores, aunque utilizan una presión que es aplicada por una bomba eléctrica que permite así un rendimiento mayor. Los filtros de bolsa constan de un caparazón con una cesta desmontada prevista de un filtro de bolsa, muy parecida a las utilizadas para el filtro de gravedad.

## **6 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL**

---

El empleo de aceites vegetales como sustituto de los combustibles convencionales comenzó en los años 80. Aunque, debido a su elevada viscosidad y baja volatilidad, el uso directo de estos aceites puede ocasionar problemas en los motores diésel.

Durante los últimos años se han llevado a cabo muchas técnicas para conseguir derivados de aceites vegetales con propiedades similares a las de los hidrocarburos derivados de los combustibles convencionales. Debido a esto, se ha conseguido que el aceite vegetal pueda ser usado como base para biocombustibles líquidos a través de diversas técnicas: dilución, micro-emulsión, pirólisis, ultrasonidos y transesterificación.

## 6.1. DILUCIÓN O BLENDING

Esta técnica consiste en mezclar aceite vegetal con diésel con la finalidad de reducir su densidad y mejorar las propiedades del mismo y su funcionamiento en un motor diésel. Se ha demostrado experimentalmente que si se combina aceite vegetal junto con combustible diésel puede ser utilizado en motores diésel convencionales.

Se demostró que mezclar 20-25% de aceite vegetal junto con el diésel mostraba buenos resultados y rendimientos. No obstante, esta mezcla presentaba algunos inconvenientes como la formación de gomas y problemas con la viscosidad. Para resolver estos inconvenientes se utilizan técnicas como la micro-emulsión, la pirólisis y la transesterificación.

## 6.2. MICRO-EMULSIÓN

Tiene la finalidad de disminuir la viscosidad de los aceites vegetales. Para formar emulsión tienen que combinarse dos líquidos inmiscibles. La mezcla puede hacerse con aceite, diésel y un dispersante, usualmente metanol, etanol, butanol o hexanol, o sólo con un agente dispersante y aceite.

No obstante, pese a que resuelve el problema de la viscosidad, el empleo de emulsiones puede producir reacciones de combustión incompletas y depósitos de carbón.

## 6.3. PIRÓLISIS O CRACKING

La pirólisis es una técnica en presencia de un catalizador que consiste en la conversión térmica de una sustancia en otra en falta de oxígeno.

La conversión térmica de los triglicéridos genera alquenos, alcanos, alcadienos, ácidos carboxílicos y compuestos aromáticos. En la siguiente figura se puede observar el mecanismo de descomposición térmica de los triglicéridos en la pirólisis. La fracción líquida que se da durante esta técnica tiene una viscosidad más baja, al igual que el número de cetano, punto de fluidez y punto de inflamabilidad con respecto al diésel.

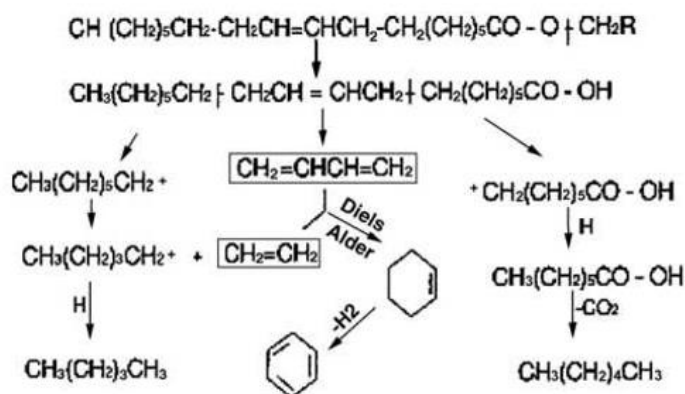


Ilustración 6.3. Reacción pirólisis

El aceite vegetal pirolizado presente agua, unos valores aceptables de azufre y buenos valores de corrosión del cobre y sedimentos, sin embargo, presenta cantidades inaceptable de cenizas, punto de fluidez y carbón residual.

## 6.4. REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

Es el método más utilizado para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales. Asimismo, el biodiésel obtenido contiene mejores propiedades que el diésel convencional con respecto a la densidad, punto flash, poder calorífico, punto de enturbiamiento y punto de fluidez.

Este proceso es una reacción de los triglicéridos que poseen los aceites o grasas con un alcohol para crear glicerina y ésteres, como podemos observar en la ilustración 6.4.1. En la transesterificación se llevan a cabo tres reacciones reversibles sucesivas en la que los triglicéridos pasan a diglicéridos, luego a monoglicéridos y, finalmente, a glicerina. Esta descomposición se puede ver en la ilustración 6.4.2.

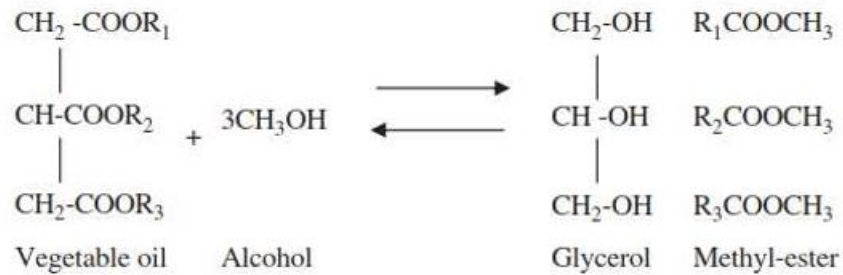


Ilustración 6.4.1. Reacción transesterificación

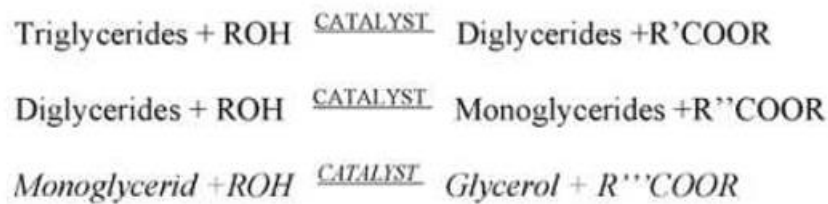


Ilustración 6.4.2. Descomposición triglicéridos/diglicéridos/monoglicéridos

Según la estequiometría de la reacción de la figura anterior, un mol de triglicéridos tiene que reaccionar con tres de alcohol para generar un mol de ésteres y otro de glicerina. No obstante, al ser la reacción reversible, habría que añadir alcohol en exceso para mover el equilibrio hacia los productos.

Debido a su bajo coste, los alcoholes más utilizados como reactivos son el etanol y metanol.

El proceso de transesterificación puede ser de dos formas: catalítica y no catalítica, según utilice catalizador o no. Los catalizadores pueden ser ácidos o básicos y se utilizan con la finalidad de incrementar la producción de biodiésel y acelerar la reacción. Al mismo tiempo, las reacciones de transesterificación catalíticas se dividen en homogéneas y heterogéneas, según si utiliza un catalizador líquido o sólido. Además, desde los últimos años se ha estudiado la transesterificación catalizada con enzimas. Con relación a la transesterificación no catalítica, se han desarrollado fundamentalmente dos tipos: transesterificación con ultrasonidos y transesterificación supercrítica.

Las variables principales que influyen en una reacción de transesterificación son:

- Temperatura de reacción
- Concentración del catalizador
- Relación molar metanol/aceite
- Pureza de los reactivos
- Intensidad del mezclado dentro del reactor

Los principales problemas de la producción de biodiésel a través de una reacción de transesterificación catalítica son los largos tiempos de reacción y la necesidad de separación del biodiésel obtenido de las impurezas tales como restos de aceite, jabones, catalizadores y alcoholes. Aparte, el gasto en agua es bastante elevado en este proceso de purificación.

## 6.5. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA BÁSICA

Este proceso se utiliza cuando el contenido en ácidos grasos libres (FFA) del aceite no supera el 1%. En caso de superarlo, sería necesario realizar un pretratamiento al aceite antes de la reacción.

Debido al bajo coste, los catalizadores más usados son el hidróxido de potasio y de sodio. Estos catalizadores, al tener una tendencia a absorber el agua y ser muy higroscópicos, su preparación de la mezcla con el alcohol debe hacerse en condiciones anhidras para que el catalizador no absorba el agua y la libere en el reactor, pues afectaría al rendimiento de la reacción.

Además de su alta actividad de los catalizadores y su bajo coste, opera a presión ambiental y a bajas temperaturas, esto hace que se facilite la operación de este tipo de sistemas.

Primeramente, el catalizador alcalino se disuelve en el alcohol para generar el metóxido que reacciona con el aceite. La mayor parte de los catalizadores básicos están en estado sólido y no son muy solubles en alcoholes, por tanto, es necesario sacudir y calentar el alcohol. Una vez esté formado el metóxido, se agrega junto al aceite al reactor para que comience la reacción. En la siguiente figura se puede ver esta técnica de forma esquematizada.

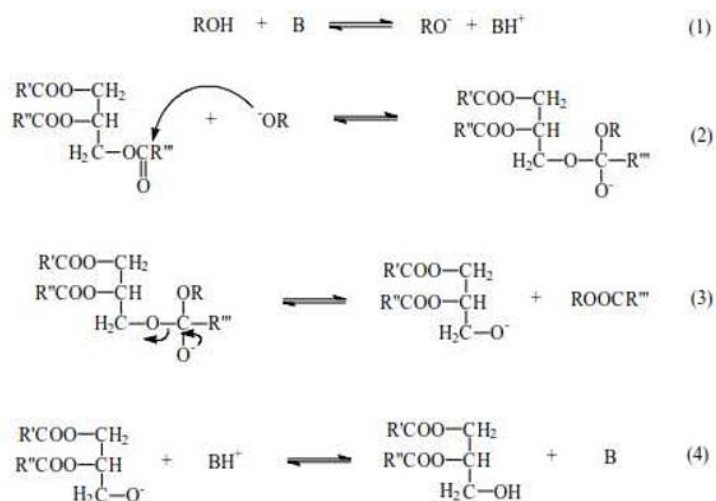


Ilustración 6.5.1. Transesterificación catalítica homogénea básica

El primer paso sería atacar al grupo carbonilo a través del anión del alcohol (ion metóxido) para crear un compuesto intermedio tetraédrico. Luego, este compuesto se reestructura formando un éster ácido graso y un diglicérido. Por último, el catalizador se desprotona reaccionando con otra molécula de alcohol, iniciando un ciclo nuevo. Siguiendo los mismos pasos, los monoglicéridos y los diglicéridos se transforman en una mezcla de ésteres de ácidos grasos y glicerina, como podemos observar en la figura anterior (figura de descomposición).

Si el catalizador liberase agua, podrían producirse reacciones de hidrólisis de los ésteres generados, llegando a producir la formación de jabones. Esto puede dificultar su purificación y disminuir la producción de biodiésel. Este proceso lo podemos ver esquematizado en la siguiente figura.

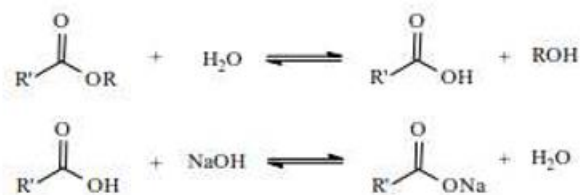


Ilustración 6.5.2. Formación de jabones en la reacción de hidrólisis de los ésteres generados

## 6.6. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA ÁCIDA

Al utilizar un catalizador ácido, se obtiene una reacción más tolerante con los FFA. Los más usados son el ácido clorhídrico, sulfónico y sulfúrico, en especial este último.

Si se usa un catalizador ácido en la transesterificación se consigue aumentar su rendimiento, aunque es más lenta que las demás, opera a temperaturas altas y puede generar corrosión en los equipos a causa del carácter ácido del catalizador.

A continuación, en la siguiente figura se puede observar el mecanismo de reacción de transesterificación homogénea ácida.

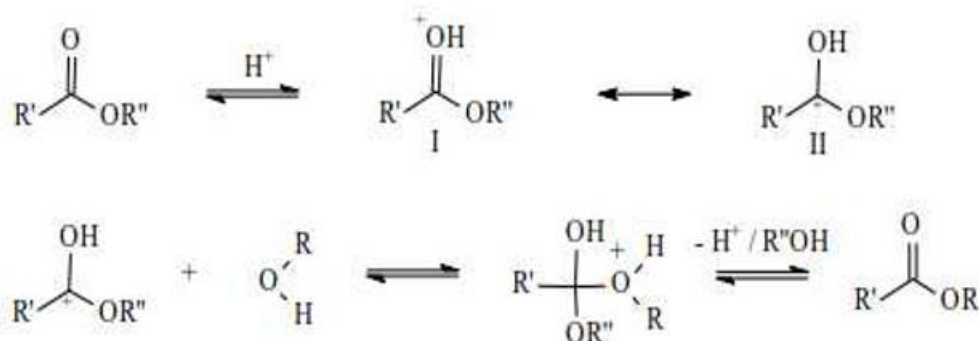


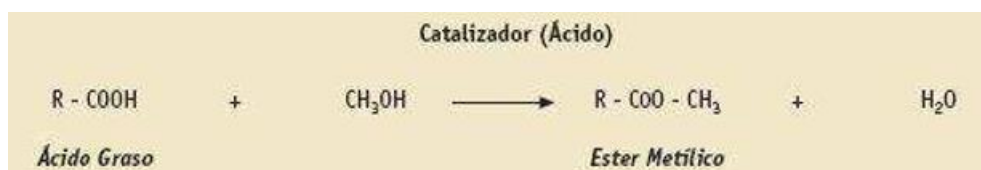
Ilustración 6.6.1. Reacción de transesterificación catalítica homogénea ácida

Donde R es el grupo alquilo del alcohol, R' es una cadena de ácidos grasos y R'' es un glicérido.

Primeramente, se produce la formación de un carbocatión a través de la protonación del grupo carbonílico del éster. Luego se genera un compuesto intermedio tetraédrico, el cual elimina una molécula de glicerol para producir otra de éster de ácidos grasos y regenerar el catalizador.

Si en dicha mezcla hubiese agua, podría reaccionar con el carbocatión y producir carboxílicos, disminuyendo así el rendimiento de la reacción. Para impedirlo, la reacción debe llevarse a cabo en ausencia de agua.

Cuando se emplean catalizadores ácidos se genera biodiésel al mismo tiempo que se efectúa una esterificación de los FFA, como podemos observar en la figura.



## Ilustración 6.6.2. Generación de biodiésel al mismo tiempo que se efectúa una esterificación de los FFA

A pesar de que la reacción de esterificación y de transesterificación se producen al mismo tiempo, en condiciones favorables, la velocidad de reacción de transesterificación es mucho más lenta que la de esterificación. A causa de esto, se utiliza la esterificación como pretratamiento del aceite para conseguir biodiésel. De este modo, se disminuye el contenido de FFA del aceite antes de realizar la transesterificación, pues estos ácidos se convierten en ésteres y disminuyen así que se formen jabones cuando se usen catalizadores alcalinos.

## 6.7. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HETEROGÉNEA

Esta técnica se refiere cuando se usan catalizadores heterogéneos. Estos catalizadores son más ventajosos frente a los catalizadores homogéneos para producir biodiésel mediante transesterificación catalítica.

Asimismo, se pueden separar fácilmente de la mezcla producto ya que son sólidos, reduciendo así las necesidades de agua a lo largo de la purificación del biodiésel.

Estos catalizadores pueden ser básicos o ácidos. No obstante, a diferencia de los procesos homogéneos, la desorción de productos y la adsorción de especies se produce en la superficie del catalizador sólido.

Los catalizadores heterogéneos básicos formados por óxidos de metales alcalinotérreos han probado ser eficientes en la transesterificación de aceites vegetales, poseen un bajo coste y una fuerte capacidad básica. Aunque, son sensibles al agua, a altas cantidades de FFA y al  $\text{CO}_2$ .

Estos catalizadores al ser tan sensible a altos contenidos en FFA, requieren un pretratamiento para reducir su contenido, y así mantener buenos rendimientos.

Respecto a los catalizadores heterogéneos ácidos, su ventaja principal es su capacidad para catalizar los procesos de transesterificación y esterificación de forma similar, como se puede ver en la figura de abajo. Se debe a que no se ven afectados por la presencia de FFA o agua. Aparte, gracias a estos catalizadores se elimina la etapa de lavado del biodiésel, son fácilmente regenerables y se minimizan los problemas de corrosión.

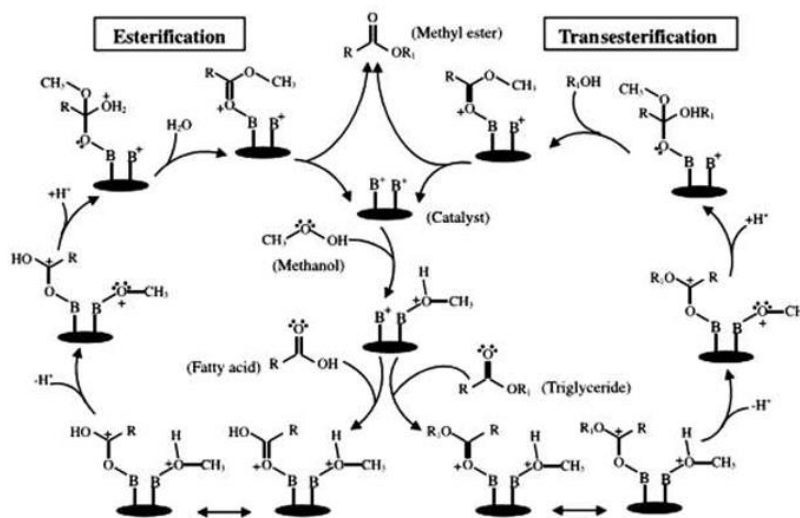


Ilustración 6.7. Transesterificación catalítica heterogénea

Los principales inconvenientes de los catalizadores sólidos ácidos son su limitada estabilidad, presentando tiempos de reacción mayores con respecto a los catalizadores sólidos alcalinos y problemas de lixiviación en los sitios activos.

## **6.8. TRANSESTERIFICACIÓN CATALIZADA POR ENZIMAS**

Las reacciones con catalizadores químicos son las más usadas, no obstante, presenta problemas con respecto a la purificación de los productos, emisión de efluentes contaminantes y recuperación de catalizadores.

A causa de esto, últimamente se han elaborado técnicas para utilizar enzimas para catalizar las reacciones de transesterificación. Por ello, se han probado lipasas como sustitución a los catalizadores químicos.

El uso de lipasas soluciona los problemas mencionados anteriormente, pues consigue que el proceso sea más eficiente, altamente selectivo, produce menos residuos y consume menos energía. Además de estas ventajas, la recuperación de la glicerina se consigue más fácilmente.

Mediante estas enzimas, se pueden conseguir rendimientos superiores al 96% en cuanto a la producción, el catalizador es fácilmente recuperable y se puede reutilizar, y puede operar en temperaturas entre 20 y 50°C. Además, estas reacciones no se ven afectadas por el contenido en FFA y en agua en las materias primas.

En la actualidad, son dos tipos de lipasas las que nos encontramos, las lipasas libres y las inmovilizadas. Las lipasas inmovilizadas son más fáciles de recuperar después de la reacción, lo que facilita su reutilización.

No obstante, posee algunos inconvenientes. El principal de ellos es el precio, ya que los catalizadores enzimáticos tienen un precio superior a los químicos. Otro problema sería que los tiempos de reacción de los catalizadores enzimáticos son bastante más largo a los catalizadores químicos. Por ello, junto con el coste elevado de la purificación de lipasas, la implementación de este proceso se hace aún muy costosa, aunque muy prometedora.

## **6.9. TRANSESTERIFICACIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDOS**

La irradiación de ultrasonidos es una técnica muy eficiente para la producción de biodiésel. Este método provoca la cavitación de las burbujas alrededor del límite de fases entre dos líquidos inmiscibles. Esto causa la ruptura del límite de fases provocando una emulsión que hace que mejore el mezclado del sistema. En base a esto, la transferencia de materia entre los reactantes se eleva considerablemente al emplear esta técnica.

Al incrementarse esta transferencia, disminuyen los tiempos de reacción. Además, la utilización de ultrasonidos consigue una eficiencia en el proceso en relación a los costes, puesto que necesita una pequeña cantidad de catalizador y mucha menos energía que en la agitación mecánica.

## **6.10. EXTRACCIÓN REACTIVA Y TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU**

La extracción reactiva se trata de extraer el aceite para que inmediatamente se ponga en contacto con alcohol, el cual actúa como solvente en la extracción y como reactivo en la transesterificación, por tanto, la transesterificación y la extracción se llevan a cabo juntas en una única etapa.

Al efectuar la transesterificación y extracción en un solo paso, se disminuye el coste económico, cantidad de solvente necesario y el tiempo del proceso.

Para este tipo de técnicas, lo mejor será utilizar catalizadores alcalinos en lugar de los ácidos, no obstante, si se encuentra un contenido elevado en FFA, se impedirá el empleo de catalizadores básicos a causa de problemas tales como la separación de productos de reacción y la formación de jabones. Para estos casos, lo mejor sería utilizar catalizadores ácidos.

## **6.11. TRANSESTERIFICACIÓN NO CATALÍTICA. TRANSESTERIFICACIÓN SUPERCRÍTICA**

Otra técnica para la producción de biodiésel sin la necesidad de utilizar un catalizador sería la reacción de transesterificación con metanol en condiciones supercríticas. De este modo, se forma una única fase en el reactor. Otra ventaja que presenta esta técnica es que el agua y los FFA afectan de manera positiva en la producción de biodiésel, por lo que pueden utilizarse materias primas de más mala calidad.

Al no usar catalizadores, no es necesario purificar el biodiésel obtenido y no se producen efluentes contaminantes, lo que lo hace una técnica más económica y respetuosa con el medioambiente.

No obstante, a causa de las elevadas temperaturas de operación, pueden aparecer reacciones de descomposición de los FAME's (cantidad de los ésteres metílicos) a lo largo de la transesterificación supercrítica, lo que conlleva a malas producciones de biodiésel.

Los indicadores principales que influyen en este proceso son la presión, la temperatura, el tiempo de reacción, la relación metanol/aceite y la agitación del medio.

Según varios estudios, la temperatura de reacción óptima oscila entre 290 y 400°C, el tiempo de reacción entre 5 y 75 minutos, dependiendo del aceite y del tipo de reactor.



# BLOQUE IV: ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DEL BIODIÉSEL OBTENIDO A PARTIR DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS

---

## 1 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL OBTENIDO DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS

---

### 1.1. INTRODUCCIÓN

La producción y explotación de biocombustibles como una alternativa energética para la sustitución paulatina y el alargamiento del tiempo de vida de los combustibles fósiles tradicionales, es hoy, un tema de primer orden en el desarrollo tecnológico. La producción de biocombustibles puede generar contradicciones asociadas a la crisis alimentaria, si no se maneja adecuadamente.

Los aceites vegetales representan una materia prima prometedora para la producción de biocombustibles, sobre todo aplicados a motores diésel, debido fundamentalmente a que son biodegradables y se obtienen a partir de materia primas renovables las cuales se encuentran distribuidas a nivel global. Para obtener un biocombustible a partir de aceites vegetales es necesario modificar algunas de sus propiedades fisicoquímicas (por ejemplo, viscosidad, contenido de ácidos grasos libres, fosfolípidos, esteroides, agua, entre otras). Con la transesterificación se logra obtener biodiesel, cuyas propiedades fisico-químicas están estandarizadas (por ejemplo, ASTM D6751, EN 14214, entre otras) y se comparan con las del combustible diésel.

La catálisis básica homogénea es uno de los procesos más utilizados para la producción de biocombustibles, con la generación de biodiesel (ésteres de ácidos grasos) y glicerina a partir de aceite vegetal o grasas animales (triglicéridos). Algunas desventajas están presentes en este proceso, tales como las etapas de separación y la purificación de la glicerina, que son las de mayor costo, el aceite debe poseer bajo contenido de ácidos grasos libres, hay riesgo de contaminación del producto por el catalizador, así como la imposibilidad de su reutilización. Por estas consideraciones este proceso aún está lejos de estar optimizado.

La *Jatropha curcas* es una variedad permanente, favorecida por sus condiciones geográficas y climáticas. Por este motivo en este trabajo se caracterizó el biodiesel obtenido a partir de aceite de *Jatropha curcas*, de acuerdo a especificaciones internacionales y pruebas en motor diésel, para las mejores condiciones de la reacción de transesterificación en el intervalo estudiado.

## **1.2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se determinaron las mejores condiciones para la reacción de transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* utilizando catalizadores homogéneos. Se verificó la influencia del tipo y concentración de catalizador, del tiempo de reacción y de la cantidad de metanol a utilizar sobre el rendimiento y la concentración de los productos finales (biodiesel y glicerina), utilizando herramientas de diseño de experimentos.

### **1.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS**

Tanto el aceite de *Jatropha curcas* como el combustible diésel utilizados cumplen con las especificaciones de calidad establecidas. El metanol utilizado tiene pureza de 99,9%. Se usaron como catalizadores el hidróxido de potasio y sodio en forma de metóxido; seleccionados teniendo en cuenta su relación efectividad/costo.

Los ensayos para la caracterización del aceite de *Jatropha curcas* y del biodiesel se realizaron siguiendo las normas internacionales aprobadas para ello.

### **1.2.2. PROCESO BÁSICO DE OBTENCIÓN DEL BIODIÉSEL DE *JATROPHA CURCAS***

La esterificación es el proceso por el cual se sintetiza un éster. El éster es un compuesto derivado de la reacción química entre un ácido carboxílico y un alcohol. En este caso, se realiza entre los ácidos grasos libres presentes en el aceite de *Jatropha curcas* y el metanol, tal y como se describe en el siguiente epígrafe. Los ácidos carboxílicos reaccionan con los alcoholes en presencia de catalizadores de la reacción, los cuales por lo general son un ácido fuerte, con la finalidad de formar un éster a través de la eliminación de una molécula de H<sub>2</sub>O, pero también se emplean catalizadores básicos. Para este trabajo se realiza la etapa previa de esterificación del aceite con una relación molar metanol/aceite 5:1, a 60°C y utilizando 0,1% de KOH como catalizador. Una vez reducido el contenido de ácidos grasos libres en el aceite vegetal es que se procede a la etapa de transesterificación.

La transesterificación consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas en la que se esterifica cada uno de los ácidos grasos unidos al glicerol y que su conversión se garantiza con un exceso de metanol para desplazar el equilibrio a la formación de los productos. Entre los catalizadores más usados se encuentran los álcalis (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, alcóxido de sodio y potasio, etc.). En esta investigación fue seleccionada la catálisis básica aplicando dos diseños factoriales independientes tal como se describe más adelante, donde se variaron el tiempo de reacción, la concentración del catalizador y la relación molar, manteniendo fijas la temperatura en 60°C y presión atmosférica.

### **1.2.3. ETAPA DE PRE-ESTERIFICACIÓN**

La pre-esterificación consistió en dos etapas de esterificación a partir de 300 g de aceite con adición de metanol a razón molar metanol/aceite 5: 1 y catalizador. Se realizaron en un vaso de precipitado con agitación a temperatura de reflujo del metanol. Se trabajó a 0,1 MPa, 60°C y 500 rpm. En la etapa 1 se utilizó 0,1% de KOH como catalizador. En la etapa 2 no se utilizó catalizador. Entre la etapa 1 y 2 la muestra se secó a 130°C. Al finalizar la etapa 2 el aceite esterificado se lavó y secó a 130°C.

### **1.2.4. REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN**

Los experimentos se realizaron en un reactor tipo autoclave PARR 4842 (Parr Instrument Inc.), de acero inoxidable, volumen útil de 300 ml, presión máxima de trabajo 68 MPa, con agitación y manta externa para calentamiento. Se controló la temperatura y la presión.

La agitación fue constante e igual a 500 rpm. En cada experimento se utilizaron 100 g de aceite esterificado y una

cantidad de metanol que variaba de acuerdo con la razón molar metanol/aceite y la cantidad de catalizador correspondiente. Las variables independientes fueron tiempo de reacción de transesterificación, concentración de catalizador y razón molar metanol/ aceite.

Al finalizar cada reacción, el producto se lavó una vez con solución de ácido cítrico al 0,015%, para neutralizar el catalizador básico, y posteriormente con agua a 45°C cuatro veces. Posteriormente se realizó el secado a 130°C, para eliminar el metanol y el agua y finalmente se pasó un flujo de nitrógeno.

### 1.2.5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para estudiar el efecto conjunto del tiempo de reacción, concentración de catalizador y razón molar metanol/aceite sobre las variables de respuesta se utilizó un diseño de experimentos factorial, 23 con tres puntos centrales. Los niveles de las variables se muestran en la tabla.

Variables independientes	Nivel Bajo	Nivel Alto
Tiempo (min) X1	30	60
Concentración de catalizador (% másico) X2	0,4	0,8
Razón molar metanol/aceite X3	6	9

Tabla 1.2.5. Niveles de las variables del diseño experimental

### VARIABLES RESPUESTA ANALIZADAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Para la selección de las mejores condiciones de operación se analizó el comportamiento de las siguientes variables respuesta: Rendimiento (mínimo 92%); Viscosidad; Contenido de ésteres; Glicerina total (máximo 0,38%); Acidez (máximo 1%) y Conversión (Xa). Para la cuantificación de estos parámetros se aplicaron las ecuaciones (1)-(3):

$$\text{Ésteres totales} = \frac{\text{masa de éster}}{\text{masa de biodiesel}} \quad (1)$$

La masa de ésteres se determinó por la masa atómica de los residuos de ácidos grasos y los grupos hidroxilo que se adicionan como resultado de la reacción de transesterificación a partir de los resultados del ensayo cromatográfico.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{masa de biodiesel}}{\text{masa de aceite}} \quad (2)$$

$$\text{Conversión (Xa)} = \frac{1 - \text{glicerina total}}{\text{gmt}} \times 100 \quad (3)$$

Donde gmt es el porcentaje de la radical glicerina en la molécula de triglicérido; se considera aproximadamente 10,5%.

### 1.3. PRUEBA EN MOTORES DIÉSEL

Las pruebas en el motor se desarrollaron en condiciones estables de carga. Se evaluó el consumo específico de combustible, así como la temperatura de los gases de escape utilizando un termopar tipo K conectado a un panel de control ubicado en la sala de pruebas. El motor usado tiene un cilindro 0,659 L, con una razón de compresión

16,5:1 y usa agua como medio de enfriamiento.

El comportamiento del torque efectivo ( $T_e$ , N·m) y la frecuencia de rotación del motor ( $n$ , rpm) se registraron directamente del panel de control ubicado en la sala de pruebas. El consumo específico de combustible (CEC, g/kW·h) se determinó a partir del gasto de horario combustible ( $Gh$ , kg/h), para lo cual se utilizó balanza digital Mettler-Toledo GmbH IND425 con una precisión de 0,01 g y las ecuaciones (4)-(6) que se muestran a continuación:

$$Ne = n \frac{\pi}{30} \cdot \left( \frac{Te}{1000} \right) \quad (4)$$

$$Gh = 3,6 \frac{mc}{t_c} \quad (5)$$

$$CEC = \frac{1000 \cdot Gh}{Ne} \quad (6)$$

Donde: Ne: potencia efectiva. kW; mc: masa de combustible, kg; y t: tiempo, h.

## 1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.4.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS

En la siguiente tabla se observa que el aceite de *Jatropha curcas* está constituido principalmente de triglicéridos con radicales de ácidos oleico, linoleico y palmítico, y presenta una acidez relativamente baja, superior a la recomendada para la transesterificación básica que es de 1 mg KOH/g<sup>12</sup>. La alta acidez provoca que la reacción de saponificación se favorezca y durante el proceso se formen emulsiones y jabones, disminuyendo el rendimiento de la reacción y tornando más lentas las etapas de separación, recuperación y purificación de los productos. Por tal motivo se realizó un pre-tratamiento al aceite para reducir la acidez. Para este pretratamiento, se trató el aceite con una disolución de hidróxido de sodio, calentando la muestra y agitando cuidadosamente de manera que no se emulsione y se separó por métodos mecánicos el jaboncillo que se produce debido a la reacción secundaria de saponificación.

Propiedades físico-químicas	Norma	Aceite J. curcas
Ácidos grasos libres (mg KOH/g)	ASTMD- 664	1,63
Densidad a 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTMD- 1298	914,9
Índice de refracción a 25°C	ASTMD- 1218	1,4670
Índice de saponificación	ASTMD- 94	165,0
Índice de todo	EN 14111	95,0
Insaponificables, %	ASTMD- 1065	1,00
Índice de peróxido	ISO 3960	9,98
Punto de solidificación, °C	D-97	<- 10,0
Color ASTM	ASTMD- 1500	1,00
Cenizas %	ABNT NBR 9842	<- 0,1
Poder calórico superior, kJ/kg		41,2
Viscosidad a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	ASTMD- 445	31,5
Composición en radicales grasos	EN 14103	
C16:0 Ácido palmítico		16,01
C18:0 Ácido esteárico		6,9
C18:1 Ácido oleico		40,1
C18:2 Ácido linoleico		35,4
C18:3 Ácido linolénico		0,3

Tabla 1.4.1. Propiedades físico-químicas del aceite de jatropha curcas

#### 1.4.2. RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS EN LA ETAPA DE TRANSESTERIFICACIÓN

Para todos los experimentos el tiempo de decantación de la fase rica en glicerina en la etapa de decantación fue de 24 horas. Las siguientes tablas muestran el resultado de las variables respuesta para cada una de las condiciones experimentales estudiadas. De ellas se puede observar que al utilizar hidróxido de potasio no se alcanzan las especificaciones para el contenido de glicerina que se presentan en la Tabla 3 (máx. 0,38%) con excepción del experimento 7, aunque con un valor muy cerca del máximo permisible. Mientras, al utilizar metóxido de sodio, es mayor el número de condiciones experimentales que cumplen la especificación (3, 7, 8, 9, 10, 11) encontrando los menores valores para las condiciones en que las variables se encuentran en sus puntos medios. Este resultado constata lo ya conocido, que la presencia de glicerina en el biodiesel es pernicioso para el motor. Este resultado se corresponde con lo planteado por Demirbas 14 que declara que los metóxidos son más eficaces que los hidróxidos correspondientes, pero son un poco más caros.

No.	X1	X2	X3	Rendimiento (%)	Acidez (%)	Ésteres (%)	Glicerina total (%)	Xa	Viscosidad a 40°C (mm <sup>2</sup> /s)
1	-1	-1	-1	95,80	0,15	87,05	1,37	86,95	5,4847
2	+1	-1	-1	92,32	0,20	85,46	1,63	84,48	5,4418
3	-1	+1	-1	91,86	0,10	97,62	0,69	93,43	4,7367
4	+1	+1	-1	99,80	0,10	96,08	0,82	92,19	4,6749
5	-1	-1	+1	90,50	0,20	88,71	1,13	89,24	5,0015
6	+1	-1	+1	94,84	0,15	95,33	0,90	91,43	4,8574
7	-1	+1	+1	95,40	0,20	99,19	0,37	96,48	4,5761
8	+1	+1	+1	94,28	0,10	88,44	0,62	94,10	4,6394
9	0	0	0	97,86	0,10	91,47	0,68	93,52	4,8242
10	0	0	0	97,51	0,15	90,05	0,68	93,52	4,8606
11	0	0	0	97,10	0,10	91,88	0,67	93,62	4,8021

Tabla 1.4.2.1. Transesterificación del aceite de Jatropha curcas con metanol, utilizando hidróxido de potasio como catalizador

No.	X1	X2	X3	Rendimiento (%)	Acidez (%)	Ésteres (%)	Glicerina total (%)	Xa	Viscosidad a 40°C (mm <sup>2</sup> /s)
1	-1	-1	-1	96,77	0,18	91,96	0,95	90,95	4,8037
2	+1	-1	-1	94,26	0,20	98,04	0,67	93,62	4,6756
3	-1	+1	-1	93,72	0,20	99,05	0,35	96,67	3,9654
4	+1	+1	-1	99,91	0,20	98,40	0,60	94,29	4,1180
5	-1	-1	+1	92,67	0,20	98,59	0,45	95,71	4,5738
6	+1	-1	+1	96,93	0,20	98,88	0,99	90,57	4,7005
7	-1	+1	+1	97,34	0,20	99,32	0,28	97,33	4,0721
8	+1	+1	+1	96,39	0,10	99,18	0,30	97,14	4,1509
9	0	0	0	98,68	0,20	98,21	0,25	97,62	4,1212
10	0	0	0	98,12	0,20	98,71	0,23	97,81	4,2518
11	0	0	0	98,13	0,20	98,88	0,26	97,52	4,0986

Tabla 1.4.2.2. Transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* con metanol, utilizando metóxido de sodio como catalizador

Por otra parte, si se comparan los valores de viscosidad cinemática para ambos catalizadores se aprecia que para el de catalizador metóxido de sodio es menor, siendo la diferencia estadísticamente significativa para 95% de confianza. El valor de viscosidad cinemática no aparece como una especificación.

Utilizando el programa Statgraphics Centurion XV se realizó el análisis de superficie de respuesta correspondiente al diseño de experimentos de las Tablas 3 y 4. En la Tabla 5 se presentan los modelos obtenidos en función de las variables significativas, para un 95% de confianza. Para las variables rendimiento (%), ésteres (%) y acidez (%) no se encontró dependencia estadísticamente significativa con las variables independientes X1, X2 y X3 en el intervalo estudiado.

Variable respuesta	Modelo	Error medio absoluto
<i>Catalizador hidróxido de potasio</i>		
Conversión %	$91,72 + 6,025 X2 + 3,55 X3$	1,257
Glicerina total %	$0,8691 - 0,6325 X2 - 0,3725 X3$	0,1322
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	$4,9 - 0,5397 X2 - 0,3163 X3 + 0,2177 X2 \cdot X3$	0,04875
<i>Catalizador metóxido de sodio</i>		
Conversión %	$95,38 + 3,645 X2$	1,659
Glicerina total %	$0,4845 - 0,3825 X2$	0,1743
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	$4,321 - 0,612 X2$	0,1081

Tabla 1.4.2.3. Modelos para correlacionar las variables de respuesta y las variables independientes

De la interpretación de estos modelos se puede concluir que, en el intervalo estudiado, la variable tiempo de reacción (X1) no es significativa. De igual forma la variable que más influencia tiene en las propiedades evaluadas es la concentración de catalizador (X2). La influencia de la variable razón molar metanol/aceite (X3) solamente es significativa para el proceso en que se utiliza el hidróxido de potasio como catalizador.

A partir de estos modelos se realizó la optimización múltiple para encontrar las condiciones de experimentación con las que se obtiene un mayor valor de la función “deseabilidad”, criterio utilizado por el programa Statgraphics Centurion XV. En la Tabla 6 se presentan las condiciones óptimas sugeridas.

Condiciones	Hidróxido de potasio	Metóxido de sodio
X1	-1	-1
X2	1	1
X3	1	-1
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	4,581	4,0
Xa	96,51	97,21
Glicerina total (%)	0,37	0,29

Tabla 1.4.2.4. Selección de las mejores condiciones experimentales

Freedman y colaboradores estudiaron el efecto de la relación molar (variando de 1:1 hasta 6:1) en la conversión del éster con aceites vegetales. Los aceites de soya, girasol y algodón presentaron comportamientos similares y obtuvieron altas conversiones (93-98%) con una relación molar de 6:1. La transesterificación de aceite de algodón con metanol, fue estudiada por Nezihe, manteniendo la relación molar alcohol/aceite en 6:1 y encontró que a 60°C y 1,5% de catalizador, la producción de biodiesel fue máxima con un valor de 92,7%. Antolín y colaboradores presentan 9:1 como relación molar alcohol/aceite óptimo para la transesterificación metílica de aceite de girasol. Utilizaron temperaturas de 60°C y 70°C. Para la producción de biodiesel a partir de aceite de maní, una proporción molar inicial etanol/aceite de 6:1 se consideró la más adecuada. Por consiguiente, los resultados alcanzados no se contradicen con los reportados por otros.

En relación con el uso del metóxido de sodio como catalizador, las grandes plantas en Europa y EEUU lo usan para producir el biodiesel por transesterificación metílica del aceite de girasol usando NaOH como catalizador encontrando determinante la concentración de 1,3% (másico) respecto a la masa inicial de aceite para las temperaturas entre 20-50°C. La optimización de la metanólisis del aceite de girasol en términos de cantidad de catalizador, también fue estudiada por Antolín y colaboradores usando el hidróxido de potasio. Las mejores conversiones se obtuvieron con una proporción 0,28% (másico) respecto a la masa inicial de aceite.

Martínez y colaboradores optimizaron la producción de biodiesel a partir de aceite de girasol por transesterificación usando Na<sub>2</sub>O soportado en zeolita y metanol. Los mayores contenidos de éster metílico (99,3%) se obtuvieron a 60°C, relación molar etanol/ aceite y concentración de catalizador 10% (másico) con un contenido de Na de 10%.

Ya para la transesterificación de aceite comestible usado, el uso de KOH presentó buenos resultados respecto al catalizador NaOH, siendo 1,0% (másico) la mejor concentración respecto a la masa inicial de aceite. Estos valores se corresponden con los obtenidos en el presente trabajo (0,80%).

Del análisis de los resultados y la comparación con la literatura se puede concluir que se debe trabajar a concentraciones de catalizador de 0,80% (másico), con un tiempo de reacción mínimo de 30 minutos y una razón molar metanol/aceite en dependencia del catalizador utilizado, pero en el intervalo entre 6:1 para el metóxido de sodio y 9:1 para el hidróxido de potasio. Estas condiciones garantizan una alta conversión (superior al 96,0%) y un bajo porcentaje de glicerina (inferior a 0,38%).

### 1.4.3. PRUEBA DE MOTORES

Durante los ensayos, las condiciones medioambientales fueron: temperatura ambiente 24 °C, presión atmosférica 1001 hPa y humedad relativa de 78,0 %. Las pruebas del motor se realizaron con combustible diésel regular y biodiesel puro (B100). En la tabla se muestran los resultados del consumo específico de combustible obtenido para ambos. Se observa que los valores para el combustible diésel resultaron menores. Esto es debido al menor poder calórico del biodiesel de *Jatropha curcas*.

n (rpm)	Ne (kW)	Combustible diesel		Biodiesel <i>Jatropha curcas</i> L	
		Gh (kg/h)	CEC (g/kW·h)	Gh (kg/h)	CEC (g/kW·h)
1300	2,72	0,96	353	1,38	507
1500	3,14	0,90	287	1,26	401
1700	3,56	1,14	320	1,5	422

Tabla 1.4.3. Consumo específico de combustible

En la siguiente figura se puede apreciar que se obtuvo una menor temperatura en los gases de escape al utilizar el biodiesel puro dado el menor poder calórico unido al tiempo de retardo de la ignición. La temperatura máxima de las emisiones de gases de escape fue 462°C cuando se utilizó el biodiesel de *Jatropha curcas*, mientras para el diésel fue 549°C.

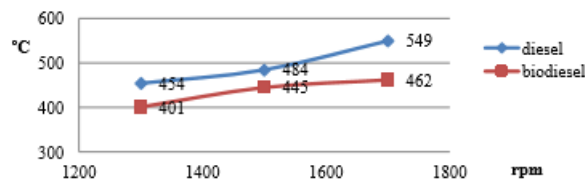


Ilustración 1.4.3. Temperaturas de los gases de escape

## 1.5. CONCLUSIONES

Para el intervalo estudiado las mejores condiciones para realizar la reacción de transesterificación del aceite de *Jatropha curcas*, para los dos catalizadores (hidróxido de potasio y metóxido de sodio) son: concentración de catalizador 0,8% (másico), tiempo de reacción 30 minutos y razón molar etanol/aceite entre 9:1 si se utiliza hidróxido de sodio, pudiendo ser menor la razón molar si se trabaja con metóxido de sodio.

El biodiesel obtenido bajo estas condiciones cumple con las especificaciones internacionales, con conversiones altas de más del 96% y el consumo específico del biodiesel de *Jatropha curcas* es mayor que el de diésel regular en un 46,30%, debido a su menor poder calórico.

Las temperaturas de los gases de escape del biodiesel son menores que las que se reportan para el diésel regular. La temperatura máxima del gas de la descarga fue 462 °C con el biodiesel de *Jatropha curcas* y 549°C con el diésel.

# 2 ESTUDIO COMPARATIVO DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA Y KARANJA EN METANOL SUPERCRÍTICO



## 2.1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista químico, el biodiesel es una mezcla de mono-alkil ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME's) principalmente obtenidos por la transesterificación de triglicéridos (TG) y un alcohol de bajo peso molecular, como metanol o etanol, requiriéndose un exceso de dicho alcohol para que la reacción tenga lugar. Esta reacción puede llevarse a cabo en presencia de catalizadores ácidos, básicos o enzimáticos. La presencia de catalizadores puede conllevar ciertas desventajas tales como largos tiempos de reacción (catálisis ácida), la limitación de usar aceites con bajo contenido en ácidos grasos libres (catálisis básica) o bajos rendimientos (catálisis enzimática). Alternativamente, la reacción de transesterificación puede llevarse a cabo en condiciones supercríticas, obteniéndose altos rendimientos sin la necesidad de emplear catalizadores.

En este trabajo se compara la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* y de *Karanja* en un proceso en una sola etapa con metanol supercrítico ( $> 240\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $>8.09\text{ MPa}$ ) en ausencia de catalizador. La evaluación de estos aceites se realiza principalmente en términos de rendimiento a FAME's, resaltando las ventajas y limitaciones de su aplicación en el proceso antes mencionado.

## 2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.2.1. Materiales

Los aceites de *jatropha* y *karanja* empleados fueron obtenidos mediante prensado en frío de semillas de *Jatropha curcas* y de *Pongamia Pinnata*, respectivamente. La composición en ácidos grasos de ambos aceites fue determinada por cromatografía de gases y se muestra en la siguiente tabla. Como alcohol se empleó metanol anhidro (Panreac Química).

ÁCIDOS GRASOS	Jatropha	Karanja
	% en peso	% en peso
Palmitico (C16:0)	16.77	11.79
Estearico (C18:0)	4.63	6.53
Oleico (C18:1)	41.49	52.57
Linoleico (C18:2)	37.04	19.53
Linolénico (C18:3)	< 0.07	3.88
Otros	< 0.07	5.7
Total	100	100

Tabla 2.2.1. Composición en ácidos grasos de los aceites investigados.

### 2.2.2. Operación

Para llevar a cabo la transesterificación del aceite en metanol supercrítico se utilizó un reactor de 83 ml de capacidad en el que se vertieron 50 g de mezcla total con una relación molar aceite: metanol de 43:1, valor dentro del rango que se ha reportado como óptimo para dicha relación, 40:1-45:1, con independencia del tipo de aceite empleado. La reacción se agitó continuamente y se investigó la temperatura (250, 275, 300, 325 y 350 °C) y el tiempo de reacción (15-90 min). El reactor es introducido en un baño de sales que permite alcanzar la temperatura deseada en pocos minutos. El tiempo de reacción empieza a contar cuando el reactor es sumergido en el baño de sales. Para interrumpir la reacción, el reactor es sumergido en un baño de agua fría. Una vez finalizado el proceso, el metanol en exceso es eliminado en un rotavapor. El reactor cuenta con sensores de presión y temperatura. Las presiones alcanzadas fueron 12 MPa a 250 °C, 18 MPa a 275 °C, 26 MPa a 300 °C, 35 MPa a 325 °C y 43 MPa a 350 °C.

### 2.2.3. Métodos analíticos

Se usó un cromatógrafo de gases Varian A 3900 equipado con un auto-sampler y un detector de ionización de llama (FID) para determinar la conversión de triglicéridos (TG) y el rendimiento a FAME's en las muestras de biodiesel obtenidas, ambos parámetros fueron determinados de acuerdo a las normas UNE-EN 14105:2003 y 14103:2003, respectivamente. La conversión de TG se expresó como moles de TG que reaccionan por moles de TG iniciales, mientras que el rendimiento a FAME's se calculó como un tercio de los FAME's generados por moles iniciales de TG. El análisis de los TG se basa en la transformación de los mismos en sus correspondientes derivados sililados usando N-MetilN-trimetilsililtrifluoroacetamida (MSTFA) y piridina, mientras que los FAME's se disolvieron directamente en heptano antes de ser analizados.

## 2.3. RESULTADOS

Durante el proceso de transesterificación, por regla general, cada molécula de TG contenida en el aceite que se transforma genera tres moléculas de FAME's. Las Figuras 2.3.1 y 2.3.2 muestran la evolución de la conversión de TG a lo largo del tiempo para los aceites de jatropha y karanja, respectivamente, a distintas temperaturas de operación. En ambos casos se puede observar que, para cualquier temperatura, a medida que aumenta el tiempo de reacción también aumenta la conversión de triglicéridos. Así mismo, al aumentar la temperatura, el tiempo que se tarda en alcanzar un valor relativamente estable de conversión es menor. De esta forma, para el caso del aceite de jatropha, el valor de conversión fue casi del 100 % tras 30 min de reacción a una temperatura de 350 °C, mientras que la conversión fue de sólo un 80 % a 275 °C tras el mismo tiempo de reacción. En el caso del aceite de karanja, la conversión tras 45 y 30 min fue prácticamente completa a 325 y 350 °C, mientras que a bajas temperaturas la conversión permaneció por debajo del 70 % tras 30 min de reacción. Temperaturas de reacción bajas favorecen la formación de productos intermedios (monoglicéridos y diglicéridos) en lugar de propiciar la transformación de los TG en FAME's. Por tanto, a la vista de los resultados obtenidos en términos de conversión, se puede concluir que para temperaturas iguales o menores a 300 °C y para tiempos bajos de reacción, los valores de conversión de TG son más altos para el aceite de jatropha que para el de karanja. Además, los tiempos necesarios para alcanzar una meseta de estabilización en la conversión de TG son más bajos en el caso del aceite de jatropha para altas temperaturas ( $\geq 325$  °C).

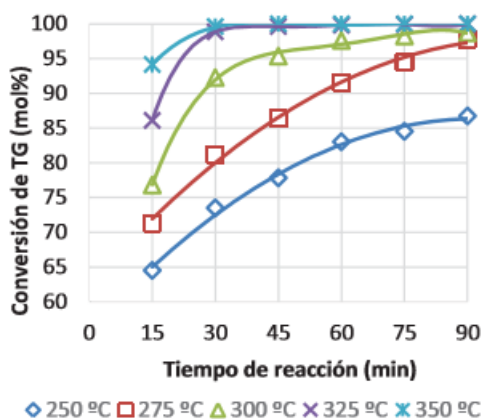


Ilustración 2.3.1. Conversión de triglicéridos (aceite de jatropha).

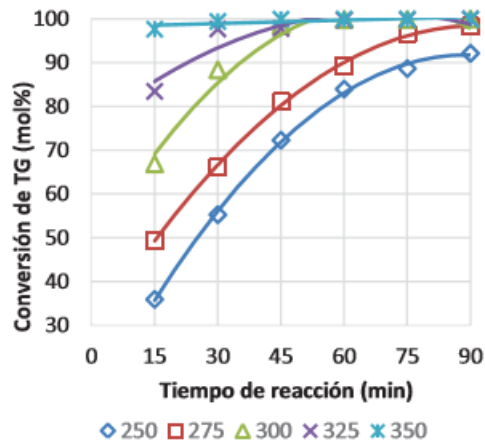


Ilustración 2.3.2. Conversión de triglicéridos (aceite de karanja).

Las Figuras 2.3.3 y 2.3.4 muestran los perfiles de rendimiento a FAME's para los aceites de jatropha y karanja, respectivamente. En general, puede observarse que el rendimiento aumenta con la temperatura y con el tiempo. Sin embargo, para las temperaturas y tiempos de reacción más altos, puede apreciarse una caída en el valor del rendimiento. En el caso de la jatropha, cuando la reacción transcurre a 350 °C, el rendimiento cae a partir de 45 min, mientras que, en el caso de la karanja, este hecho ya es observable a 325 °C a partir de 75 min, y a 350 °C a partir de los 30 min. La caída del rendimiento a elevadas temperaturas está asociada con la descomposición térmica de los ésteres metílicos de ácido graso que se han formado, principalmente de los insaturados. Comparando los datos de conversión y de rendimiento a FAME's, para cualquier temperatura y tiempo de reacción, puede verse que el rendimiento es inferior a la conversión de triglicéridos, debido, por un lado, a la formación de productos intermedios a temperaturas moderadas y, por otro, a la posible descomposición térmica a temperaturas altas. Así, para el caso de la jatropha, mientras que a una temperatura intermedia de 300 °C la conversión de TG fue del 95 % tras 45 min de reacción, el rendimiento a FAME's fue sólo de alrededor del 70 %. En el caso de la karanja, para la temperatura más elevada, 350 °C, y tras 90 min de reacción, la conversión fue prácticamente completa, mientras que el rendimiento a FAME's fue aproximadamente del 60 %.

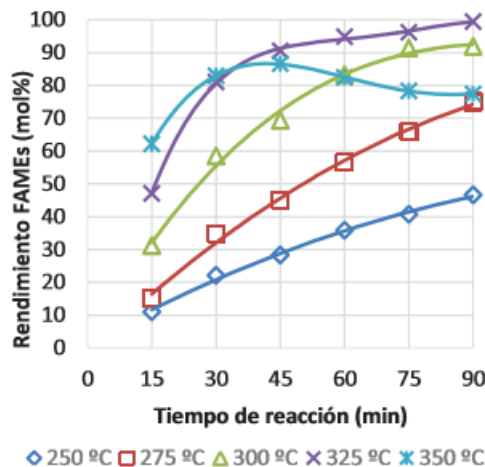


Ilustración 2.3.3. Rendimiento de biodiesel (aceite de Jatropha).

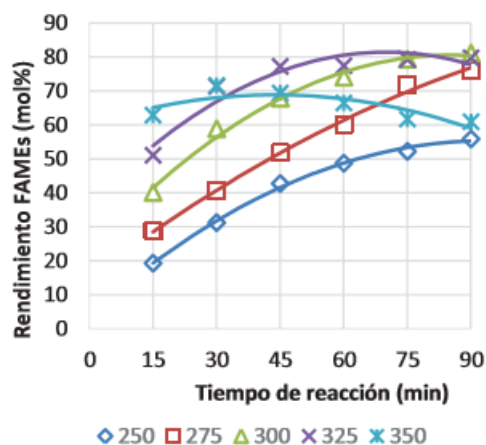


Ilustración 2.3.4. Rendimiento de biodiesel (aceite de Karanja).

Atendiendo a los rendimientos máximos obtenidos en cada caso, el rendimiento a FAME's con el aceite de jatropha fue de más del 99.5 % tras 90 min de reacción a 325 °C, mientras que en el caso de la karanja el rendimiento máximo, que se alcanzó a 300 °C tras 90 min, no llegó al 82 %. Estos resultados indican que el perfil de ácidos grasos del aceite condiciona el rendimiento máximo a FAME's que se puede lograr en condiciones de reacción supercríticas.

El bajo rendimiento obtenido en el caso del aceite de karanja puede explicarse por el mayor grado de descomposición térmica de los productos de reacción obtenidos ya que, como se ha visto antes, la caída de rendimiento es observable a partir de 325 °C. De acuerdo a la composición de ácidos grasos de los aceites estudiados, el aceite de jatropha posee un mayor contenido de ácido palmítico (ácido saturado) comparado con el aceite de karanja y prácticamente no contiene ácido linolénico (ácido triinsaturado), que sí está presente en el aceite de karanja. Los ésteres metílicos derivados de ácidos poliinsaturados como el ácido linolénico (linolenato de metilo) tienden a descomponer a temperaturas mayores o iguales a 325 °C, mientras que los ésteres derivados de los ácidos saturados como el ácido palmítico (palmitato de metilo) no sufren procesos de descomposición térmica importantes en el rango de temperaturas estudiado. Esto explicaría los mayores rendimientos a FAME's alcanzados con el aceite de jatropha a altas temperaturas, lo que indica que sería preferible llevar a cabo la producción de biodiesel a partir de aceite de jatropha según un proceso en una etapa con metanol supercrítico.

## 2.4. CONCLUSIONES

El presente trabajo, en línea con la tendencia actual de utilización de aceites no comestibles para la producción de biodiesel, ofrece un estudio comparativo de la síntesis supercrítica de biodiesel a partir de dos tipos de aceite no comestible, jatropha y karanja. Se ha analizado la conversión de triglicéridos y el rendimiento de biodiesel durante la reacción de transesterificación con metanol supercrítico en un rango de temperatura de 250-350 °C y de tiempo de reacción de 15-90 min. Los resultados muestran que la conversión fue casi completa para ambos aceites tras 90 min de reacción. Sin embargo, a cualquier tiempo y temperatura de reacción, el rendimiento a FAME's fue siempre menor que la conversión de triglicéridos debido tanto a la formación de productos intermedios (en condiciones de reacción moderadas), como a la aparición de reacciones de descomposición térmica de los FAME's (biodiesel) generados (en condiciones de reacción severas). El rendimiento máximo a FAME's para el aceite de jatropha fue mayor del 99 %, mientras que para el aceite de karanja fue menor del 82%, lo que puede ser explicado por el menor contenido de ácido palmítico y el mayor porcentaje de ácido linolénico del aceite de karanja.

# 3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE Y SEMILLAS DE JATROPHA CURCAS, USANDO CATALIZADORES INMOVILIZADOS Y TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU ASISTIDA POR ULTRA SONIDO

---

## 3.1. INTRODUCCIÓN

El potencial de los biocombustibles como respuesta alternativa a la creciente demanda energética mundial, aumento del consumo de combustibles fósiles y el agotamiento de las reservas de petróleo, se presenta como un camino transitorio a mediano plazo en el desarrollo de tecnologías de producción energéticas tendientes a las cero emisiones y de carácter renovable, con un alto atractivo para ambientalistas, industriales y científicos, quienes en muchos casos se ven atraídos por la oportunidad de generar conocimiento, crear nuevas y modernas industrias, o mitigar la contaminación del medio ambiente y atenuar los detrimentos mercantiles ocasionados por alteraciones climáticas antropogénicas.

En este sentido, Akorede manifiesta que la producción y utilización de combustibles derivados del petróleo no son renovables y encabezan la lista de actividades responsables de generar los principales GEI. Además de lo anterior, Bajaj et ál (2009) pone en manifiesto que el precio de los petrocombustibles se ha incrementado en los últimos años; por lo tanto, cada día el interés por energías alternativas y renovables ha crecido.

Asimismo Colombia (2008) ha incursionado en la investigación, desarrollo e implementación de los Biocombustibles, como una de las medidas para disminuir principalmente la generación de GEI, la dependencia de petróleo, diversificar la producción agropecuaria y conquistar nuevos mercados, es así como Fedebiocombustibles (2014) los define sucintamente como combustibles biodegradables generados a partir de especies vegetales ricas en carbohidratos y lípidos de origen de especies vegetales y animal; que por procesos industriales son convertidas en bioetanol y biodiesel respectivamente.

En cuanto a las materias primas vegetales empleadas, Balat (2010) y Perdomo et. ál (2013), enuncian que el biodiesel sintetizado a partir de aceites vegetales no comestibles, se ha obtenido principalmente de especies oleaginosas que incluyen *Jatropha curcas*, karanja *Pongamia pinnata*, las semillas de tabaco *Nicotiana tabacum* L., salvado de arroz, mahua *Madhuca indica*, el neem *Azadirachta indica*, árbol de caucho *Hevea brasiliensis*, las semillas de lino, árbol de ricino o higuera *Ricinus communis* L., entre otras. De las cuales una de las que más se ha venido investigado es la *Jatropha curcas* una especie vegetal que Achten et ál describen como un arbusto grande perteneciente a la familia Euphorbiaceae, nativo de México pero ampliamente distribuida en las zonas tropicales del mundo, que inicia su producción a partir de los dos años de haberse establecido y que hoy día ha despertado el interés de investigadores debido a sus aplicaciones versátiles, tolerancia a periodos de sequía, bajos costos de mantenimiento del cultivo, bajos requerimientos nutricionales, recicla el 100% de las emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten en combustión del biodiesel, produce un aceite no comestible de carácter toxico; es decir, un cultivo potencial para la explotación en Colombia si se tiene en cuenta que el Ministerio de Agricultura de Colombia (2008), manifiesta la existencia de una desproporción en el uso de las tierras, dado que los terrenos disponibles para la explotación forestal, son usados parcialmente y las tierras con potencial agrícola alcanzan las 21.5 millones de Hectáreas, de las cuales únicamente se utilizan 4,2 millones, quedando cerca de 17.3 millones de

Hectáreas potenciales para la explotación del cultivo de *Jatropha curcas*.

En lo que refiere al sector productivo en la actualidad también existe preocupación por los catalizadores que se emplean en la transesterificación de aceites vegetales, en presencia generalmente de catalizadores como hidróxidos de sodio NaOH, hidróxido de potasio KOH, con los cuales se obtienen las mayores velocidades de reacción; sin embargo, ésta catálisis se ve seriamente afectada cuando el aceite presenta trazas de agua y AGL, con lo cual genera reacciones indeseadas de saponificación que afectan directamente la separación de la glicerina la cual se obtiene como una solución acuosa con una pureza relativamente baja; y en cuanto a la separación del catalizador, independientemente de la calidad del aceite, éste se obtiene mediante neutralización en soluciones acuosas, generando aguas residuales contaminantes.

La posibilidad de generar combustibles a partir del aprovechamiento de los aceites vegetales (Semillas de *Jatropha curcas*), se ha usado para manejar aspectos de impacto ambiental y darle sustentabilidad a estos procesos, a partir de esto se realizó la evaluación del proceso de obtención de metilésteres de ácidos grasos por transesterificación convencional e in-situ, donde encontramos que este método experimental generaría tiempos extensos en sus reacciones si se usaran las mismas condiciones que en el proceso convencional, puesto que no se hace una extracción previa del aceite, lo que conlleva a que se utilicen mayores cantidades de reactivos como catalizadores y alcoholes para su adecuado procedimiento.

No obstante, la transesterificación In-situ es uno de los métodos que tienen algunas ventajas sobre transesterificación directa, en comparación la transesterificación In-situ resultaría más rápida debido a que la extracción del aceite y la conversión de biodiesel se llevaría a cabo en un solo paso.

En cuanto a la aplicación del ultrasonido para mejorar las reacciones asistentes en dicho proceso, hace que se presenten investigaciones evolutivas donde se han encontrado óptimos y eficientes resultados. Además, la aplicación del ultrasonido en el proceso de transesterificación in-situ hace que pueda correr en línea en lugar de utilizar el lento método de procesamiento por lotes.

Esta técnica del ultrasonido se ha usado para manejar aspectos de impacto ambiental, incluyendo en esta labor además de la tecnología, la ingeniería pura y otras disciplinas que de manera transversal trabajan para hacer eficiente y confiable estos desarrollos. Se ha comparado la producción de biodiesel de aceite de *Jatropha Curcas* L. por agitación mecánica y ultrasonidos y se ha demostrado que el tiempo necesario para la producción de biodiesel puede reducirse mediante el uso de ultrasonido.

## **3.2. METODOLOGÍA**

### **3.2.1. OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO CATALIZADORES (HIDRÓXIDO DE POTASIO, CARBONATOS)**

Recepción del aceite de *Jatropha Curcas* y refinación. La materia prima objeto de esta investigación fue adquirida con la empresa Colbio S.A. La refinación del aceite de *Jatropha curcas*, se realizó teniendo en cuenta las etapas de acidificación o desgomado, neutralización, lavado y secado de acuerdo a metodologías establecidas por Ángel Fernando Espinal Méndez y Kuan-Ting Liu et al, y NTC 218. Asimismo, se determinaron parámetros fisicoquímicos tales como: Índice de humedad (NTC 287). Índice de acidez (NTC 218). Índice de yodo (NTC 283). Densidad (NTC 336). Índice de refracción (NTC 289) pH mediante método analítico.

Para determinar el diseño experimental se estableció el método de superficie de respuesta, considerando variables tales como: temperatura, relación molar aceite- alcohol, tiempo, Concentración Catalizador (%), Velocidad de agitación (rpm). Los datos obtenidos se analizaron mediante Software comercial (STATGRAPHICS Centurion XV.v. 16.1.15.). Para la variable en evaluada, se calcularon los datos con su respectiva desviación estándar. Los valores medio y los cuantitativos se compararon mediante análisis de varianza (ANOVA) con diseño completamente al azar, utilizando la mínima diferencia significativa  $\alpha=0,05$  para prueba Durbin-Watson (DW).

## MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA TRANSESTERIFICACIÓN

La transesterificación se llevó a cabo en un matraz fondo plano de boquilla esmerilada, con capacidad para 250 ml, dispuesto sobre un Agitador Magnético con Calentamiento y sonda para control de temperatura Modelo MSH-20D WiseStir; el intercambiador de calor fue alimentado con agua desde un equipo de circulación refrigerado tipo chiller marca PolyScience, el cual mantuvo a  $15^{\circ}\text{C} \pm 1$  la temperatura el refrigerante. Una ilustración acerca del montaje se observa a continuación en la figura.

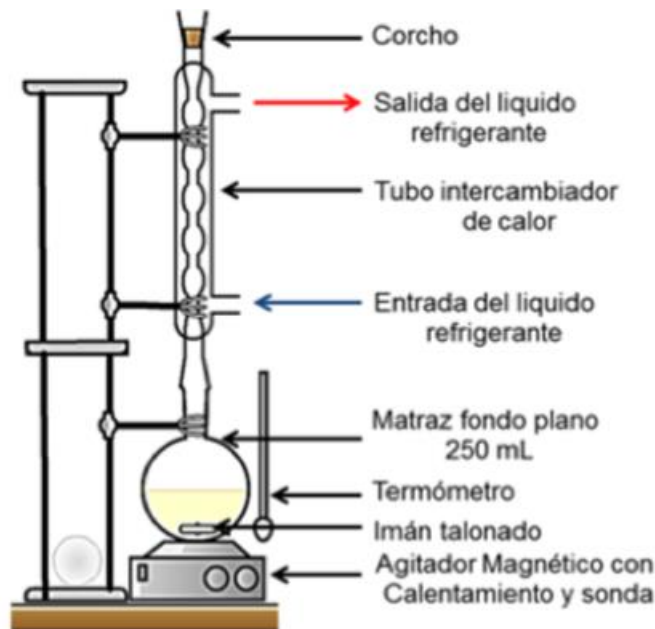


Ilustración 3.2.1. Montaje experimental para la transesterificación

Previamente a la reacción se mezcló el etanol y la cantidad de catalizador (Hidróxido de potasio) hasta que éste se disolvió completamente en el alcohol (solución alcalina). Las variables del proceso como temperatura y velocidad de agitación fueron establecidas de acuerdo al diseño de experimentos; una vez alcanzadas éstas, se cronometró el tiempo de reacción.

Una vez transcurrido el tiempo de reacción, se inhibió la transferencia de calor y se anuló la velocidad de agitación; además, se dejó reposar el sistema por 5 minutos y se pasó la mezcla reaccionante por un equipo de roto-evaporación, con el fin de recuperar la cantidad de alcohol que pudiese haber quedado sin reaccionar.

Posteriormente, la mezcla se llevó a un embudo de separación y se dejó reposar por 12 horas para evidenciar la separación del biodiesel, catalizador y glicerina. El biodiesel proveniente de esta separación se sometió a lavados sucesivos en embudo de separación, con agua acida a una temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  y una agitación suave con el fin de no generar emulsión. Por último, el biodiesel se sometió a un secado suave en horno, para evaluar la cantidad de esteres formados, mediante cromatografía de gases, teniendo en cuenta la norma europea EN 14103.

#### DETERMINACIÓN DE RENDIMIENTO DE METILÉSTERES POR CROMATOGRAFÍA GASEOSA

El contenido de metilésteres de las muestras obtenidas de biodiésel fue estimado según la norma europea EN 14103.

### **3.2.2. OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS UTILIZANDO CATALIZADOR INMOVILIZADO EN CONDICIONES DE LABORATORIO**

## INMOVILIZACIÓN DEL CATALIZADOR

A continuación, en la siguiente figura, se relacionan las etapas en las cuales se realizó la inmovilización del catalizador.



Ilustración 3.2.2. Etapas en el proceso de inmovilización del catalizador

## TRANSESTERIFICACIÓN CON CATALIZADOR INMOVILIZADO

El montaje experimental de transesterificación se realizó según se muestra en la figura 1. Como materia prima se usó el aceite de *Jatropha curcas* previamente refinado, como solvente se utilizó el etanol y como catalizador el hidróxido de sodio inmovilizado en la zeolita Y. Este último fue empaquetado en la columna de vidrio, con el fin de permitir el paso del etanol hacia el balón aforado en el cual se efectuó la reacción. El proceso estuvo conectado a un chiller con el fin de mantener el sistema refrigerado. Esta reacción se llevó a cabo bajo las condiciones del diseño experimental.

## SEPARACIÓN DEL BIODIÉSEL

Posterior al proceso de transesterificación, se obtuvo el biodiesel. Sin embargo, este último debe pasar por una serie de procesos con el fin de remover las impurezas y obtener un biodiesel listo para caracterizar.

### **3.2.3. OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL POR MEDIO DE TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU A PARTIR DE SEMILLAS DE *JATROPHA CURCAS***

## CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

Para determinar la cantidad de aceite presente en la semilla seleccionada se hizo una extracción soxhlet usando n-hexano, se trituraron 60 gramos de semilla y se secaron a 105°C durante dos horas para eliminar la humedad presente en ésta, se emplearon 360 ml de n-hexano y se sometió al soxhlet durante aproximadamente 6 horas.

El índice de acidez del aceite extraído de las semillas por extracción soxhlet se determinó mediante la norma UNE EN ISO 660. Adicionalmente se determinó el índice de yodo, la humedad, el pH, la densidad e índice de refracción bajos las normas NTC respectivamente.



## DISEÑO EXPERIMENTAL

Se empleó la metodología de superficie de respuesta, comprendiendo un diseño central compuesto, estudiando de este modo los efectos de la temperatura de reacción, la concentración del catalizador, el tamaño de partícula, velocidad de agitación, el tiempo de reacción y la relación molar metanol: semilla, en este caso llamados factores, sobre el rendimiento del biodiesel, estipulado como variable de respuesta.

Se obtuvo un diseño con 46 experimentos y para asegurarla reproducibilidad de cada uno se decidió hacer una réplica de cada uno de ellos.

## ADECUACIÓN DE LA SEMILLA

Las semillas de *Jatropha* se almacenaron en la oscuridad en recipientes herméticos para evitar la foto oxidación, así como para minimizar la absorción de humedad. La totalidad de la semilla entera de *Jatropha* fue utilizada en este experimento. A continuación, la figura muestra la secuencia experimental en la Adecuación de la semilla de *Jatropha curcas*.



Ilustración 3.2.3. Secuencia experimental en la adecuación de la semilla de *Jatropha curcas*

Las semillas tuvieron un proceso de limpieza y descascarillado, luego se realizó una breve clasificación entre las semillas maduras y las semillas secas, estas fueron pesadas en una balanza analítica. Posteriormente, se procedió al descascarillado donde se separó de forma manual la cascara del grano.

Después de haberse realizado la adecuación de las semillas, se procedió a eliminar la humedad contenida en estas, este proceso de secado tuvo un tiempo aproximado de 12 horas a una temperatura de 105°C, donde al finalizar se comprobó que las partículas presentaran máximo 5% de humedad.

Finalizado el proceso de eliminación de humedad, las semillas fueron trituradas en una picadora manual (OSTER) para reducir el tamaño de la partícula. Para este procedimiento se utilizaron 120g de semilla con un periodo de 15 pulsaciones por cada molienda. Por consiguiente, se realizó el tamizado, para esto se utilizó un tamizador por vibración, con el fin de separar las semillas Trituradas o fraccionadas en 4 diferentes tamaños 1 μm, 0,8 μm, 0,5 μm y 0,2 μm. Estas semillas fueron puestas en un desecador de pan y secadas en un horno desecado a 105°C durante una hora.

## TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU A PARTIR DE SEMILLAS DE JATROPHA CURCAS

En cada experimento, se utilizaron 20 g de semillas de *Jatropha* trituradas y previamente secadas a 105 °C. Se hizo reaccionar las semillas con el etanol, en el cual se disolvió la cantidad establecida de NaOH en un balón de 250 ml. Las condiciones de relación semilla: alcohol, concentración de catalizador, tiempo de reacción, tamaño de partícula, temperatura y velocidad de agitación se establecieron de acuerdo al diseño experimental.

La muestra se hizo reaccionar en una plancha de calentamiento con agitación magnética durante 2 horas a una velocidad de mezclado de 500 rpm aproximadamente.

## OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL DE JATROPHA CURCAS

Al finalizar el tiempo de reacción, la mezcla se dejó decantar durante 12 horas (para garantizar la separación de fases). Al día siguiente se filtró con bomba de vacío utilizando un embudo Buchner para separar la torta de las semillas de *Jatropha* de la mezcla líquida (Biodiésel, glicerina, catalizador y alcohol). Se registró el peso residual de la torta. Seguidamente la mezcla líquida se rotó evaporó a 450 mbar y 70 °C para recuperar el metanol que no reaccionó. Se pesó la mezcla biodiésel y glicerina, para separar la glicerina (fase inferior) del biodiésel (fase superior) se usó un embudo de decantación y se pesó la glicerina obtenida.

A continuación, se lavó el biodiésel con agua acidulada (agua destilada y HCl) a 65 °C, para retirar el catalizador y demás impurezas, para ello se aplicaron 3 lavados. Finalmente, el biodiésel fue secado en un horno a 30 °C durante 3 horas para luego enfriarlo a temperatura ambiente en un desecador y pesarlo. Se almacenó en frascos de vidrio color ámbar para su posterior análisis y determinación del % de metilésteres FAME).

Se determinó el rendimiento de cada una de las muestras obtenidas por medio de la cantidad de biodiésel obtenido con respecto a la cantidad de aceite contenida en la semilla implementada en la reacción.

### **3.2.4. OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL POR MEDIO DE TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU ASISTIDA POR ULTRASONIDO**

#### TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU ASISTIDA POR ULTRASONIDO A PARTIR DE SEMILLA DE JATROPHA CURCAS

La transesterificación in-situ asistida por ultrasonido de las semillas de *Jatropha Curcas* L., se llevó a cabo en un reactor discontinuo, el cual se puede observar en la figura. El montaje que consta de los siguientes equipos: un baño de ultrasonido, un sistema de refrigeración (refrigerante y un equipo Schiller), un motor de agitación mecánica conectado a un controlador de RPM, un termómetro y un balón de 3 bocas de 500 ml.

Previamente a la reacción se mezcló el etanol y la cantidad de catalizador establecida a cada una de las pruebas hasta que éste se disolvió completamente en el alcohol (solución alcalina), posteriormente se adicionó alrededor de 20 gramos de semilla según el tamaño de partícula ajustado en el diseño y secadas previamente a 105°C durante dos horas para retirar la humedad. Se introdujo el reactor en el baño de ultrasonido y se acondicionaron las variables restantes según esta ajustado el diseño. Las relaciones de temperatura, velocidad de agitación, tamaño de partícula, tiempo de reacción, concentración de catalizador y relación molar fueron establecidas previamente en el diseño de experimentos.

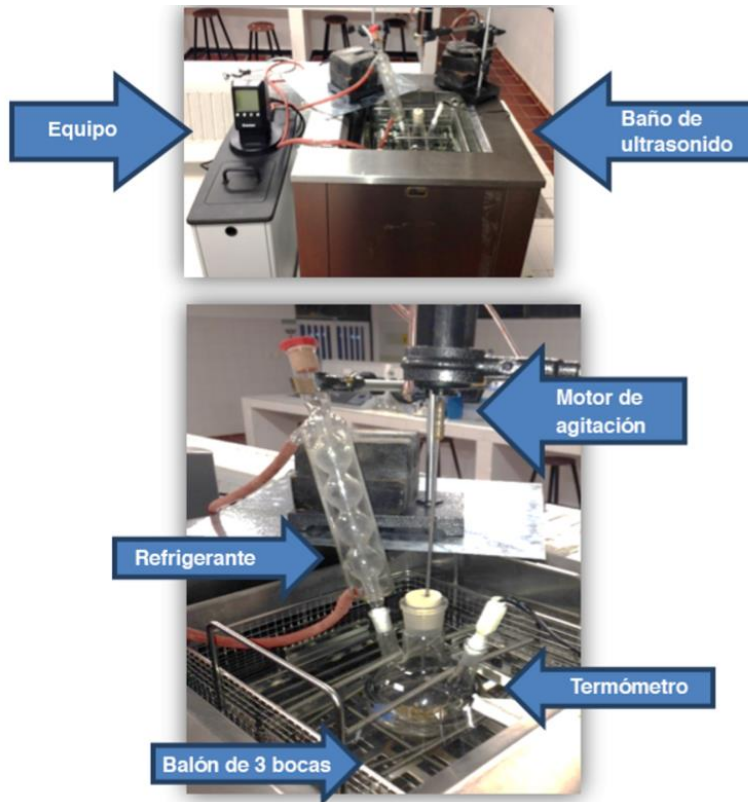


Ilustración 3.2.4.1. Montaje de transesterificación in situ asistida por ultrasonido

A continuación, en la figura 5 se muestra la secuencia experimental en el desarrollo del proceso de transesterificación in situ asistida por ultrasonido con semillas de *Jatropha curcas*.

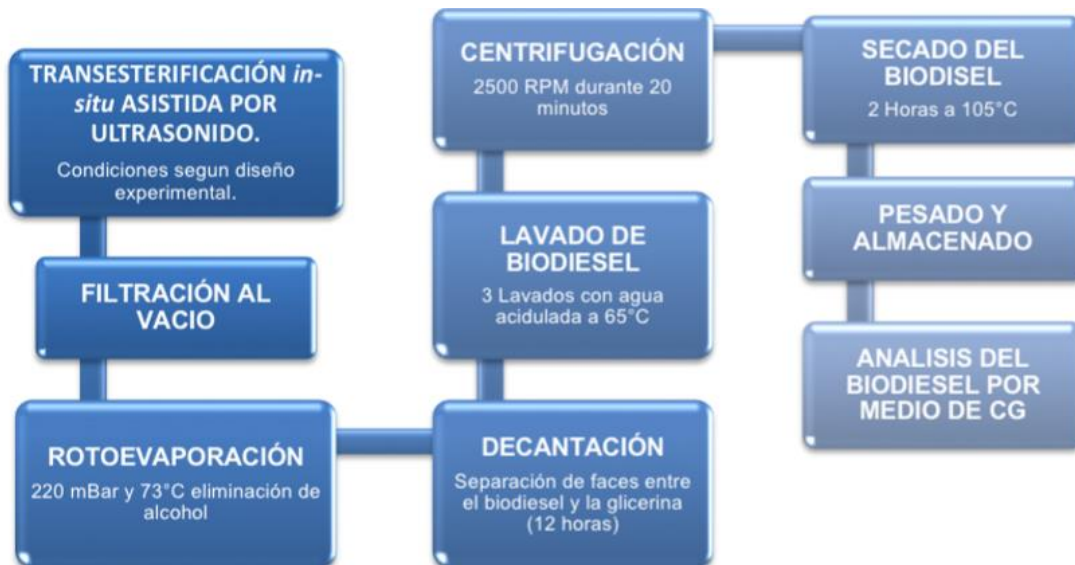


Ilustración 3.2.4.2. Secuencia experimental de la transesterificación in situ asistida por ultrasonido

En el análisis de Cromatografía de Gases se utilizó la técnica de determinación de metilésteres de ácidos grasos, en el Cromatógrafo de Gases 5890 series II, bajo la norma EN 14103. Se utilizó Metanol (99.8 % pureza), NaOH 0.1N, la fenolftaleína, biftalato de potasio, tetracloruro de sodio ó cloroformo, yoduro de potasio, reactivo de Wijs, solución de almidón, el tiosulfato de yodo, hexano, yodo, ácido acético glacial, heptano, heptadecanoato de metilo, acetona, trincaprin, butanitriol y derivatizante MSTFA.

### 3.3. RESULTADOS

#### 3.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El índice de acidez del aceite obtenido fue 2,512 mg de NaOH/g de aceite, que equivale a un porcentaje de acidez de 0,26 (gramos de AGL/g de muestra). Este parámetro no supera el valor máximo establecido de 3,0 mg de NaOH/gramo de aceite (Norma de calidad para aceites vegetales DIN V 51605).

<b>CARACTERIZACION FISICO-QUIMICA DEL ACEITE</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Índice de acidez</b>	2,512 mg NaOH/ g Aceite
<b>Índice de yodo</b>	218 mg Yodo/100g
<b>Humedad</b>	14,69%
<b>Densidad</b>	885g/ml
<b>Índice de refracción</b>	71,1%
	1468 Nd
<b>Ph</b>	4,98

Tabla 3.3.1. Caracterización físico-química del aceite de *Jatropha curcas*

#### 3.3.2. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO HIDRÓXIDO DE POTASIO COMO CATALIZADOR

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los rendimientos obtenidos de acuerdo con el diseño experimental. En cada corrida se utilizó hidróxido de potasio como catalizador.

<b>Temperatura</b>	<b>RM aceite/ alcohol</b>	<b>Tiempo Agitación</b>	<b>Conc. Catali.</b>	<b>Vel.Agitación</b>	<b>Rendimiento</b>
°C	Moles	Minutos	%	RPM	%
<b>90</b>	9	67,5	0,4	315	94,5
<b>70</b>	6	90	0,6	300	94,3
<b>70</b>	12	90	0,2	300	95,7
<b>50</b>	9	67,5	0,55	315	95,9
<b>40</b>	12	90	0,6	300	95,2
<b>50</b>	9	112,5	0,4	315	95,8
<b>50</b>	9	67,5	0,4	345	93
<b>50</b>	9	67,5	0,4	315	94,6
<b>40</b>	6	45	0,2	330	94,8
<b>50</b>	9	67,5	0,4	285	93,8
<b>40</b>	12	45	0,2	300	94
<b>70</b>	12	45	0,2	330	94,9
<b>40</b>	6	90	0,2	300	94,4
<b>70</b>	12	45	0,6	300	93,5
<b>50</b>	9	22,5	0,4	315	95,3
<b>70</b>	6	45	0,2	300	93,6

30	9	67,5	0,4	315	95,5
40	6	45	0,6	300	93,3
40	12	45	0,6	330	93,9
50	9	67,5	0,8	315	95,6
40	12	90	0,2	330	94,7
40	6	90	0,6	330	96
70	12	90	0,6	330	95
50	3	67,5	0,4	315	93,2
50	15	67,5	0,4	315	95,4
70	6	45	0,6	330	93,7
50	9	67,5	0,4	315	93,4
70	6	90	0,2	330	94,2

Tabla 3.3.2. Resultados del rendimiento de acuerdo con diseño experimental

### 3.3.3. RESULTADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO HIDRÓXIDO DE SODIO COMO CATALIZADOR

En la tabla 3.3.3, puede observarse que los factores más influyentes en cuanto al rendimiento de biodiesel son la concentración del catalizador y la temperatura de reacción, obteniéndose el mayor rendimiento (97%) a concentraciones de catalizador en 0,2% p/p, esto concuerda con investigaciones realizadas por Olusegun D. et al. (2008), que reportan la importancia del catalizador en la transesterificación; y concluye que la conversión del aceite en ésteres metílicos es muy alta normalmente cuando se utiliza metanol e hidróxido de sodio; en su trabajo obtuvo para el girasol rendimientos de aproximadamente el 97% y para la soja del 88%.

En el caso de la temperatura, se puede observar que a 60°C hay mayor influencia para la transesterificación, sin despreciar que los triglicéridos se pueden convertir en biodiesel a baja y alta temperatura con rendimientos por encima del 50%; estos valores no concuerdan con las investigaciones realizadas por Kasim et al. 2010, donde se estipula que en el proceso de transesterificación, la temperatura no tiene un efecto significativo en el rendimiento de biodiesel, dada que la reacción de obtención de biodiesel se ha presentado a temperaturas inferiores a 60°C.

La influencia de la relación molar de alcohol en el rendimiento del biodiesel y sugieren que la cantidad de etanol debe ser muy alta para lograr una velocidad de reacción apreciable del aceite de *Jatropha Curcas* L., logrando rendimientos de 97%. En el caso de la velocidad de agitación, se puede observar que, a 300 rpm, hay mayor influencia para la transesterificación, lo que se puede deducir que la velocidad de reacción cuando se aumenta se obtiene un mejor rendimiento esto hace que se considere como una variable constante en el proceso de obtención de transesterificación.

	<b>Temperatura</b>	<b>RM Aceite/Alcohol</b>	<b>Tiempo Reacción</b>	<b>Velocidad Agitación</b>	<b>Concentración Catalizador</b>	<b>Rendimiento</b>
Nº	°C	Moles	Minutos	RPM	%	%
1	60	9	65	300	0,2	97
2	50	6	45	330	0,2	95,3
3	50	9	45	330	0,6	96,2
4	70	7,5	67,5	315	0,4	96,7
5	50	6	90	300	0,2	96,3
6	90	6	45	300	0,2	94,9
7	70	7,5	67,5	315	0,8	95,5
8	70	7,5	22,5	315	0,4	95,4
9	90	9	90	300	0,2	95,2
10	70	7,5	112,5	315	0,4	94,3
11	90	9	45	300	0,6	96,6
12	70	7,5	67,5	315	0,4	95,9
13	70	10,5	67,5	315	0,4	94,8
14	50	6	45	300	0,6	94,7
15	50	9	90	330	0,2	95,8
16	30	7,5	67,5	315	0,4	94,6

17	50	9	90	300	0,6	94,2
18	90	6	90	330	0,2	95,6
19	50	6	90	330	0,6	96,9
20	90	9	45	330	0,2	96,4
21	110	7,5	67,5	315	0,4	96
22	70	7,5	67,5	285	0,4	95
23	90	9	90	330	0,6	94
24	90	6	90	300	0,6	96,5
25	70	7,5	67,5	345	0,4	94,5
26	90	6	45	330	0,6	95,7
27	70	4,5	67,5	315	0,4	96,8
28	70	7,5	67,5	315	5,55E-17	94,4

Tabla 3.3.3. Resultados del rendimiento de acuerdo con diseño experimental

En conclusión, y según los datos experimentalmente obtenidos y mostrados en la tabla 3, se seleccionó como óptima la muestra 1, la cual se llevó a cabo a Temperatura de 60°C, concentración de catalizador de 0,2 gramos de NaOH/gramos de aceite, tiempo de reacción de 65 min, velocidad de agitación de 300 rpm y relación molar de 9:1 metanol: aceite, obteniendo un rendimiento de 97%p/p.

### 3.3.4. RESULTADOS EN LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CONDICIONES DE LABORATORIO UTILIZANDO CARBONATO COMO CATALIZADOR

Al obtener biodiésel usando un carbonato como catalizador no se superó el 20% de rendimiento en esta investigación, mientras que con hidróxido de sodio atrapado en zeolita Y, se obtuvo un 87% de rendimiento que, pese a que está por debajo del mínimo de calidad que es 90%, se observa potencial para seguir experimentando con este tipo de catalizador.

Las técnicas experimentales de transesterificación in situ y transesterificación in situ asistida por ultrasonido alcanzaron 93 y 94,5 % de rendimiento respectivamente. (Ver tabla).



Temperatura (°C)	Relación molar. Aceite/alcohol o Semilla/alcohol	Tiempo reacción Min	Catalizador %p/p	Agitación RPM	Tamaño partícula µm	Rendimiento %
70	7,5	180	1,2	250	-	87
70	175	120	1,2	450	0,2	93
50	300	45	0,2	200	0,5	94,5

Tabla 3.3.4. Valores máximos de rendimiento para el biodiésel obtenido por técnicas experimentales

En este sentido, el rendimiento para la transesterificación in situ asistida por ultrasonido alcanzó un rendimiento de 94,5% a temperatura de 50 grados centígrados y un tiempo de 45 minutos, haciendo de este un sistema que pueda plantearse como candidato para un piloto de producción de biodiesel, por esta razón quien en adelante experimente para alcanzar mejores rendimientos y pretenda hacer un pilotaje usando transesterificación in situ deberá hacerlo por este sistema donde la técnica in situ es asistida por ultrasonido, con los pasos que se resumen a continuación:

La configuración del reactor utilizado fue de un baño de ultrasonido, un sistema de refrigeración (refrigerante y un equipo Schiller), un motor de agitación mecánica conectado a un controlador de RPM, un termómetro y un balón de 3 bocas de 500 ml necesarios para el proceso discontinuo. Este reactor se convierte en una alternativa interesante a escala de laboratorio con muchas posibilidades para transesterificar aceites con la técnica in situ asistida por ultrasonido en este caso utilizando *Jatropha Curcas* como materia prima, sin embargo, es importante probar otros tipos de aceites con potencial para producir biodiesel siempre buscando mejor calidad para comparar su rendimiento, tales como los provenientes de la higuera, colza, la soja.

De acuerdo a los hallazgos obtenidos, debe hacerse una caracterización fisicoquímica de la semilla y del aceite contenido en su interior, así como considerar cada una de las etapas que se desarrollaron en este trabajo de investigación y que se resumen en la figura 5.

### 3.4. CONCLUSIONES

La optimización de la variable rendimiento, en la obtención del biodiesel con hidróxido de potasio como catalizador, los tres mayores valores de rendimiento de acuerdo a los resultados fueron 96, 95,9 y 95,8 %, siendo 96% el valor máximo de rendimiento bajo las condiciones de temperatura de 40°C, relación molar aceite/alcohol de 1:6, tiempo de reacción de 90 minutos, concentración de catalizador del 0,6% p/p, Velocidad de agitación de 330 rpm. Bajo este modelo tenemos que las mencionadas condiciones son las óptimas para obtener el máximo rendimiento, manteniendo los estándares de calidad del Biodiesel.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el software utilizado en el presente ensayo, las condiciones de temperatura de 50°C, relación molar de 1:9, tiempo de reacción de 67.5 minutos, concentración de catalizador del 0,4% p/p, Velocidad de agitación de 315 rpm. Bajo este modelo tenemos que las mencionadas condiciones son las óptimas para obtener el máximo rendimiento con menor requerimiento de energía en procesos de calentamiento y agitación, menor tiempo de residencia en el reactor y menor cantidad de catalizador, en comparación con el comportamiento del rendimiento, manteniendo los estándares de calidad del Biodiesel.

En la optimización del rendimiento en la obtención de biodiesel usando hidróxido de sodio como catalizador, se obtuvo un rendimiento de 97% a una temperatura de 60°C cada uno, con lo que se podría considerar la posibilidad de evaluar su eficiencia a escala piloto en futuros trabajos a realizar. Experimentalmente se encontró que la muestra 1 reportó las mejores condiciones de operación para la obtención de biodiesel por transesterificación, con una Temperatura de 60°C, catalizador de 0,2 gramos de NaOH/gramos de aceite, tiempo

de reacción de 65 min, velocidad de agitación de 300 rpm y relación molar de 9:1 metanol: aceite, Estas condiciones reportaron un rendimiento de 97%p/p.

En cuanto a los métodos experimentales desarrollados, tenemos que en la obtención de Biodiesel a partir de aceite de *Jatropha Curcas L.*, por transesterificación con catalizadores inmovilizados es un método viable ya que se logra controlar el contenido de acidez en el aceite. Se obtuvo un rendimiento de 87% a una temperatura de 70°C. Experimentalmente se encontró que la muestra 27 reportó las mejores condiciones de operación para la obtención de biodiesel por transesterificación, con una Temperatura de 70°C, concentración de catalizador de 1,2 gramos de NaOH/gramos de aceite, tiempo de reacción de 180 min, velocidad de agitación de 250 rpm y relación molar de 1: 7,5 aceite: alcohol, estas condiciones reportaron un rendimiento de 87%p/p. Se logra disminuir las variables estimadas por el software estadístico STATGRAPHIC CENTURION XVI.1.15, en este caso evidenciamos el tiempo de reacción, la temperatura, relación molar aceite: alcohol, velocidad de agitación y concentración de catalizador inmovilizado logrando así optimizar las condiciones de la reacción de obtención de biodiesel por transesterificación. Por lo anterior, se podría considerar la posibilidad de evaluar su eficiencia a escala piloto en futuros trabajos a realizar.

Para la técnica experimental transesterificación in situ (extracción reactiva), en las pruebas preliminares se determinó la caracterización físico-química del aceite contenido en la semilla de *Jatropha Curcas*, Se obtuvo que la semilla contiene un porcentaje de aceite de 40% p/p, este valor se encuentra en el rango de 35-55% p/p. El índice de acidez de 2,512 mg de NaOH/g de aceite, que equivale a un porcentaje de acidez de 0,26 (gramos de AGL/g de muestra), un pH de 4,98, el índice de yodo de 218 mg Yodo/100g, humedad de 14,69%, densidad de 885 g/ml e índice de refracción de 71,1% - 1468 Nd. con lo anterior, se podría considerar la posibilidad de evaluar su eficiencia a escala piloto en futuros trabajos a realizar.

La obtención de Biodiesel a partir de semillas de *Jatropha Curcas L.*, por transesterificación in-situ asistida por ultrasonido es una técnica que permitió obtener rendimientos de 94,2% y 93,85% a una temperatura de 50°C y 70°C respectivamente, razón que impulsa a la inclinación por esta técnica en el método en condiciones de laboratorio que se desea proponer, y adicionalmente se podría considerar la posibilidad de evaluar su eficiencia a escala piloto en futuros trabajos a realizar.

## 4 TRANSESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA DEL ACEITE DE JATROPHA

---

### 4.1. INTRODUCCIÓN

El biodiesel es un combustible renovable que se puede sintetizar a partir de aceites comestibles, no comestibles y residuales. Debido a la disminución de las reservas de petróleo, los aceites vegetales han llamado la atención como una posible fuente renovable para la producción de alternativas al combustible diésel a base de petróleo. Se han desarrollado varios procesos para la producción de biodiesel que implican catálisis química o enzimática o tratamiento con alcohol supercrítico. La transesterificación enzimática de triglicéridos es una buena alternativa a los procesos químicos debido a su naturaleza ecológica, selectiva y los requisitos de baja temperatura.

Se han utilizado muchos materiales de partida como el aceite de soja, el aceite de girasol, el aceite de semilla de algodón, el aceite de colza, el aceite de palma y los desechos de cocina de restaurantes, evaluados

para la preparación de biodiesel por la ruta enzimática. En muchos países donde los aceites comestibles no tienen excedentes, es necesario buscar materiales de partida alternativos, como el aceite de *Jatropha curcas*. Las semillas y el aceite son tóxicos debido a la presencia de ésteres de forbol tóxicos. El contenido de aceite de la semilla de *Jatropha* varía de 30 a 50% en peso, mientras que en el grano el contenido de aceite varía de 45 a 60%. La composición de ácidos grasos del aceite de *Jatropha* consiste en ácido oleico 43.1%, ácido linoleico 34.3%, ácido esteárico 6.9%, ácido palmítico 4.2% y otros ácidos 1.4%.

Hay muchos informes sobre la producción de biodiesel utilizando catálisis enzimática por lipasas libres o inmovilizadas. La lipasa inmovilizada en particular es adecuada para la producción continua de biodiesel debido a la facilidad de su recuperación de la mezcla de reacción. Existen dos limitaciones principales de la síntesis de biodiésel catalizada por lipasa. Uno es el costo más alto (que puede reducirse hasta cierto punto mediante la inmovilización) y otro es su inactivación por metanol y glicerol. Se ha informado que como el metanol es insoluble en aceites vegetales, inhibe las lipasas inmovilizadas y, por lo tanto, disminuye la actividad catalítica de la reacción de transesterificación. Además, el subproducto hidrofílico glicerol también es insoluble en el aceite, por lo que se adsorbe fácilmente en la superficie de la lipasa inmovilizada y produce un efecto negativo sobre la actividad de la lipasa y la estabilidad operativa. Se ha informado el uso de varios solventes como n-hexano y éter de petróleo en el medio de reacción, pero el problema persistió ya que la inhibición de las lipasas todavía se produjo debido a la escasa solubilidad del metanol y el glicerol en los solventes hidrófobos. Hay algunos informes sobre síntesis mejorada de biodiesel en presencia de t-butanol como disolvente. Como tanto el metanol como el glicerol son solubles en t-butanol, el efecto inhibitorio del metanol y el glicerol sobre la actividad de la lipasa se reduce. Además, el t-butanol no es un sustrato para las lipasas porque no actúa sobre los alcoholes terciarios.

En la presente investigación, la metanólisis del aceite de *Jatropha* se realizó utilizando lipasa inmovilizada de *Enterobacter aerogenes* en presencia de t-butanol como disolvente.

## **4.2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.2.1. PRODUCTOS QUÍMICOS**

Se ha requerido aceite de *Jatropha* (grado HPLC), metanol, oleato de metilo y varios solventes y reactivos.

### **4.2.2. PRODUCCIÓN DE LIPASA**

Todos los experimentos se llevaron a cabo utilizando lipasa de *E. aerogenes*. La producción de lipasa extracelular de *E. aerogenes* se llevó a cabo en matraces Erlenmeyer de 250 ml, cada uno de los cuales contenía 50 ml de un medio compuesto de peptona (0.5%), extracto de levadura (0.3%), NaCl (0.25%), MgSO<sub>4</sub> (0.05%) y aceite de coco (3.0%) a pH 7.0. El medio se esterilizó y se inoculó con 3,5 ml (4 x 10<sup>8</sup> células / ml) de inóculo seguido de incubación durante 60 h a 34 ° C con agitación a 200 rpm. Al final del período de incubación, se recogió el sobrenadante de los medios de fermentación por centrifugación a 6987 g durante 10 min. El sobrenadante se trató con acetona (1: 4 v / v) durante 1 h a 4 ° C seguido de centrifugación a 6987 g durante 10 min. El precipitado se disolvió en tampón fosfato 50 mM (pH 5,0) y se liofilizó para usarlo como preparación de lipasa cruda para la inmovilización posterior.

### **4.2.3. ENSAYO ENZIMÁTICO**

El ensayo de lipasa se realizó espectrofotométricamente utilizando palmitato de p-nitrofenilo como sustrato. El p-nitrofenol se liberó del palmitato de p-nitrofenilo por hidrólisis mediada por lipasa. Una unidad (U) de lipasa se definió como la cantidad de enzima que libera un micromol de p-nitrofenol por minuto en las condiciones del ensayo.

#### 4.2.4. INMOVILIZACIÓN DE LIPASA

La lipasa de *E. aerogenes* se inmovilizó en sílice activada con etanolamina seguido de reticulación con glutaraldehído, como se describió anteriormente.

#### 4.2.5. CONFIGURACIÓN DE REACCIÓN PARA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

La reacción de transesterificación se llevó a cabo a 30 ° C en viales con tapón de rosca colocados dentro de un agitador recíproco. La mezcla de reacción inicial consistió en una relación molar de aceite: metanol de 1: 2, una relación de volumen de t-butanol: aceite de 0.2, *aerogene* inmovilizada de 20 U y 200 rpm (a menos que se indique lo contrario), junto con los controles respectivos (muestras sin enzima). Todos los experimentos se realizaron por triplicado y los resultados se informaron como la media  $\pm$  desviación estándar.

#### 4.2.6. MUESTREO Y ANÁLISIS

Se tomaron muestras de la mezcla de reacción a intervalos de tiempo especificados. Las muestras se centrifugaron a 6987 g durante 10 minutos a 4 ° C para eliminar el vehículo que contiene la enzima inmovilizada (negando así las posibilidades de reacción adicional) seguido de una dilución de 100 veces de la muestra inicial con n-hexano. Las pruebas de estabilidad se realizaron en t-butanol en cada ciclo (hasta 20 ciclos) y las actividades enzimáticas inmovilizadas residuales y sobrenadantes se probaron para determinar la lixiviación enzimática durante más de siete ciclos; no se observó lixiviación de enzima ni en el sobrenadante ni en la enzima inmovilizada residual.

La síntesis del éster metílico de ácido graso se analizó inyectando las alícuotas diluidas de la mezcla de reacción en un cromatógrafo de gases (Agilent 6820). La temperatura de la columna se mantuvo a 150 ° C durante 0,5 min, se elevó a 250 ° C a 15 ° C / min y se mantuvo a esta temperatura durante 6 min. Las temperaturas del inyector y el detector se ajustaron a 245 y 350 ° C, respectivamente. El % de conversión molar de los productos se identificó comparando las áreas de pico de los ésteres metílicos estándar en tiempos de retención particulares. La cuantificación de los productos finales (ésteres metílicos de ácidos grasos) se realizó a partir de las curvas de calibración de los ésteres metílicos de ácidos grasos puros (oleato de metilo, linoleato de metilo, estearato de metilo y palmitato de metilo).

### 4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.3.1. EFECTO DE LA RELACIÓN MOLAR SUSTRATO

Se investigó el nivel óptimo de concentración de metanol para la síntesis máxima de biodiésel. La reacción de transesterificación se realizó a 30 ° C, utilizando lipasa inmovilizada con diferentes relaciones molares como se muestra en la siguiente figura. Se usó alcohol en exceso de la relación molar estequiométrica de 1: 3 (aceite: metanol) para asegurar un mayor rendimiento de biodiésel. Como se esperaba, un aumento en el número de moles de alcohol con respecto a los triglicéridos dio como resultado un aumento en la producción de ésteres. Finalmente, la formación de ésteres alcanzó un nivel máximo con relación molar 1: 4 de aceite de *Jatropha*: metanol, y un aumento adicional en la concentración de alcohol resultó en una disminución en la formación de ésteres. Las tasas máximas de síntesis de biodiésel a partir del aceite de colza y el aceite de semilla de algodón se informaron en relación 1: 3.6 y 1: 4 de aceite: metanol, respectivamente.

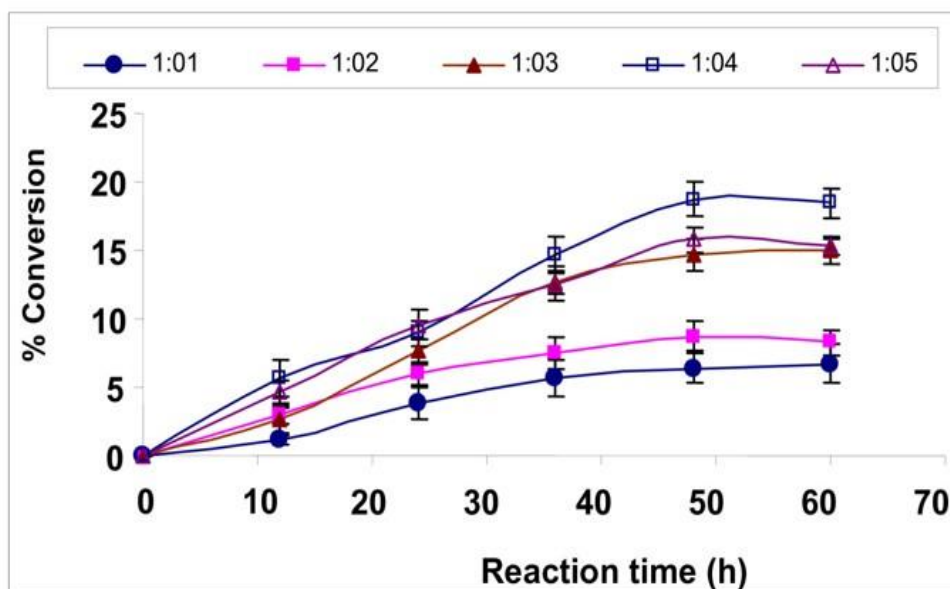


Ilustración 4.3.1. Nivel óptimo de concentración de metanol para la síntesis máxima de biodiésel

#### 4.3.2. EFECTO DE LA REACCIÓN MOLAR DEL SUSTRATO SOBRE LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL

Condiciones de reacción: 20 U de lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada, t-butanol: relación de volumen de aceite de 0.2, 30 ° C y 200 rpm. Los datos se representan como media  $\pm$  desviación estándar de la observación por triplicado.

#### 4.3.3. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN

En el caso de catalizador inmovilizado, los reactivos deben difundirse desde el líquido a granel a la superficie externa de la partícula y desde allí a los poros interiores del catalizador. Las limitaciones de la transferencia de masa externa pueden minimizarse llevando a cabo la reacción a una velocidad óptima de agitación. El efecto de la velocidad de agitación en la conversión se estudió en el rango de 100 a 250 rpm (ver figura). Se encontró que el porcentaje de conversión aumentó con velocidades de 100 a 200 rpm. Sin embargo, no se observó un aumento adicional en el porcentaje de conversión a 250 rpm, lo que puede deberse al cizallamiento de las moléculas de enzima. Así, se encontró que la velocidad óptima para la reacción de transesterificación era 200 rpm.

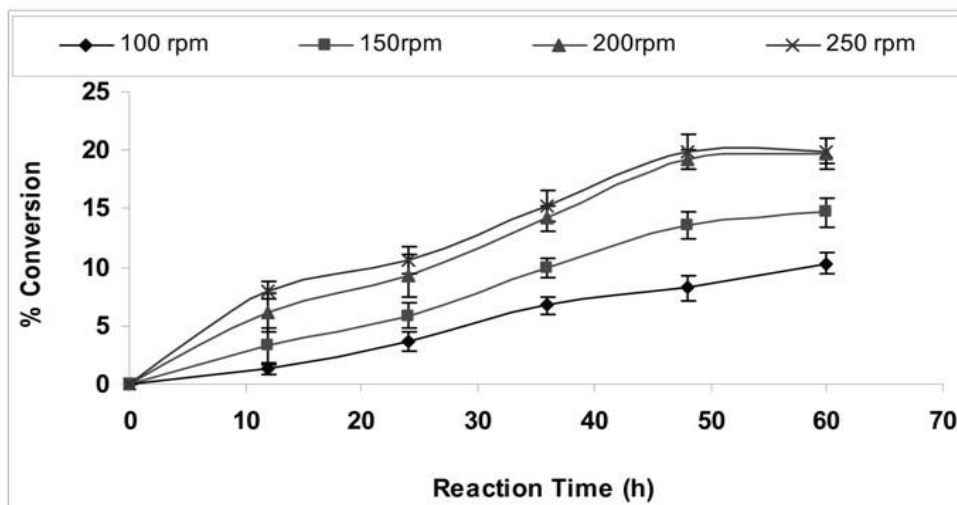


Ilustración 4.3.3. Efecto de la velocidad de agitación

#### 4.3.4. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL

Condiciones de reacción: relación molar 1: 4 de aceite a metanol, 20 U de lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada, t-butanol: relación de volumen de aceite de 0.2 y 30 ° C. Los datos se representan como media  $\pm$  desviación estándar de la observación por triplicado.

#### 4.3.5. EFECTO DE LA CANTIDAD DE T-BUTANOL

La síntesis de biodiésel estuvo muy influenciada por la adición de t-butanol a la mezcla de reacción. En ausencia de t-butanol no hubo síntesis de biodiesel, lo que puede deberse a la inhibición de la lipasa por metanol. En general, la transesterificación del aceite de jatropha se llevó a cabo utilizando etanol. La inmersión de lipasas en t-butanol y otros alcoholes con un número de carbonos de más de tres se reclamó como un método de tratamiento previo para aumentar la actividad de la lipasa en la síntesis de ésteres metílicos. Además, los efectos negativos causados por el metanol y el glicerol pueden eliminarse mediante la capacidad del t-butanol para disolver tanto el metanol como el glicerol. Se agregaron varias cantidades de t-butanol a la mezcla de reacción para observar el efecto de la concentración de t-butanol en la reacción de transesterificación. Se encontró que el porcentaje de conversión de biodiésel aumenta considerablemente con el aumento de la relación de volumen de t-butanol: aceite con una conversión máxima en una relación de volumen de t-butanol: aceite de 0,8 (ver figura). Al aumentar aún más la concentración de t-butanol, no se observó ningún incremento en la síntesis de biodiésel.

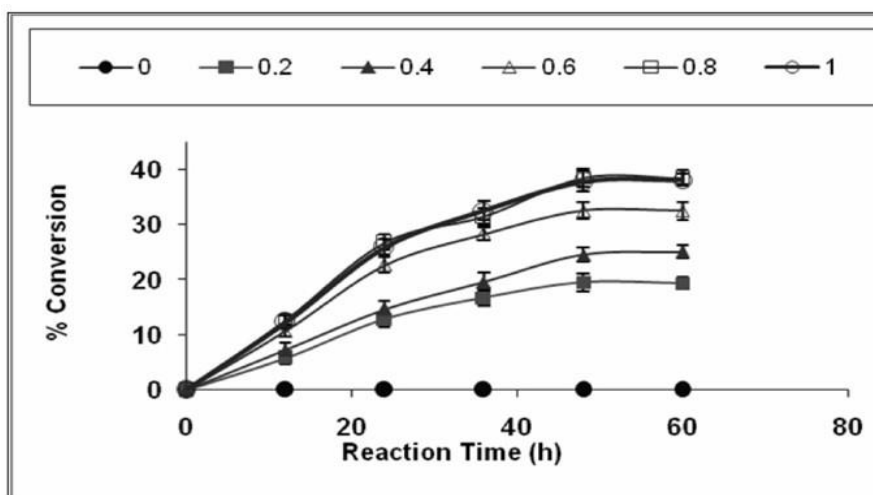


Ilustración 4.3.5. Efecto de la cantidad de T-butanol

#### 4.3.6. EFECTO DEL T-BUTANOL. DIVERSAS RELACIONES DE VOLÚMEN DE T-BUTANOL/ACEITE EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL

Condiciones de reacción: relación molar de aceite a metanol 1: 4, 20 U de lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada a 30 ° C y 200 rpm. Los datos se representan como media  $\pm$  desviación estándar de la observación por triplicado.

#### 4.3.7. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN

Un aumento en la temperatura acelera las reacciones mediadas por enzimas como cualquier otra reacción no catalizada por enzimas. Sin embargo, las enzimas son proteínas y dependen de su estructura específica para su actividad, y pueden desnaturizarse cuando se calientan más allá de una temperatura óptima. Se realizaron experimentos en el rango de temperatura de 30 a 55 ° C para examinar el efecto de la temperatura

sobre la lipasa inmovilizada para la síntesis de biodiésel a una relación molar de aceite de jatropa: metanol 1: 4 con 20 U de lipasa inmovilizada (ver figura 4.3.7). Se encontró que la actividad de transesterificación de la lipasa aumenta continuamente con el aumento de la temperatura, con una conversión máxima a 55 ° C. Royon et al también llevaron a cabo la transesterificación del aceite de semilla de algodón en t-butanol a 50 ° C. La energía de activación se calcula a partir del gráfico mostrado en la Figura 4.3.8 donde la pendiente era igual a  $-E/R$ . En la presente reacción, la energía de activación aparente fue de 14,73 kJ / mol. Royon et al informaron una energía de activación de 19.2 kJ / mol para la transesterificación del aceite de semilla de algodón.

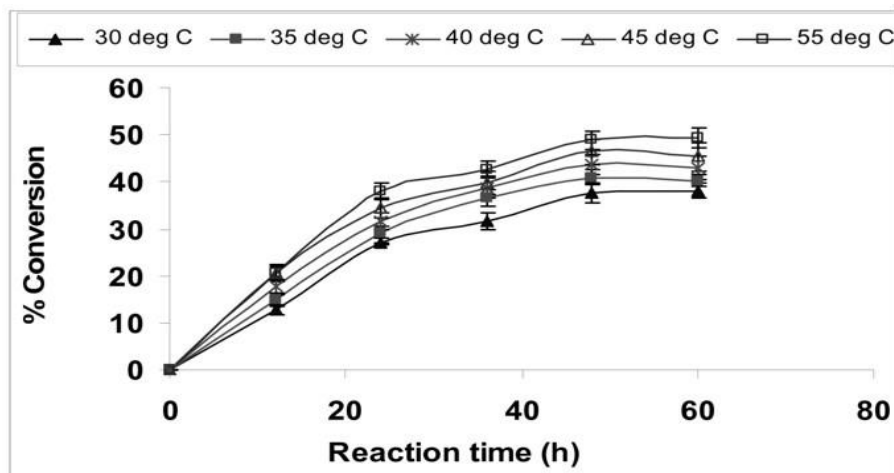


Ilustración 4.3.7. Efecto de la temperatura de reacción

#### 4.3.8. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL

Condiciones de reacción: relación molar de 1: 4 de aceite a metanol, 20 U de lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada, t-butanol: relación de volumen de aceite de 0,8 y 200 rpm. Los datos se representan como media  $\pm$  desviación estándar de la observación por triplicado.

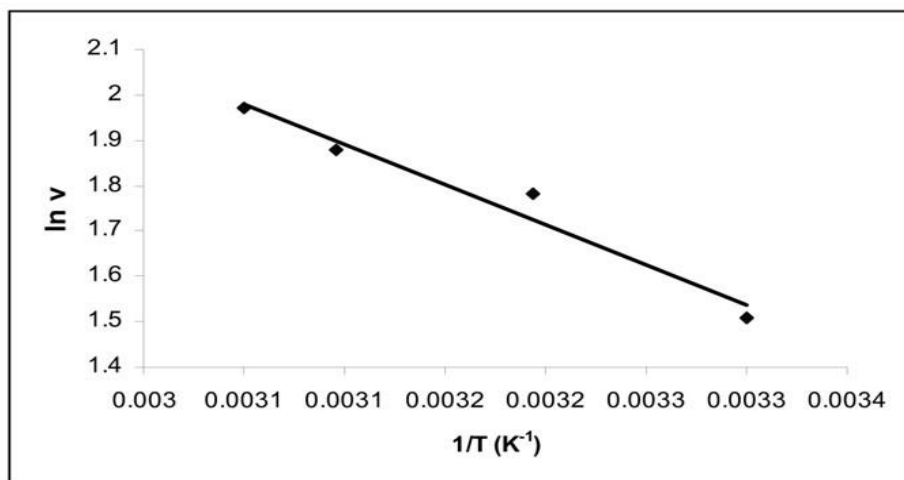


Ilustración 4.3.8. Gráfico de Arrhenius de la energía de activación para la síntesis de biodiésel por lipasa *E. aerogenes*.

#### 4.3.9. EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA ADICIONAL

Un hilo común en todos los estudios de enzimas en medios orgánicos es que la cantidad de agua asociada

con la enzima es un determinante clave de las propiedades (por ejemplo, actividad, estabilidad y especificidad) que exhibe la enzima. El efecto de la concentración inicial de agua sobre la reacción de transesterificación se investigó mediante la adición de agua que oscila entre el 5 y el 20% (v / v) de la cantidad total de la mezcla de reacción (ver figura). Se observó que el porcentaje de conversión era máximo cuando no había agua adicional en la mezcla de reacción. Aunque el agua es necesaria para la adquisición y el mantenimiento de la conformación catalíticamente activa de las enzimas en solventes orgánicos esencialmente anhidros, el agua también está involucrada en muchos procesos de inactivación de enzimas. Siempre que se asocie una cantidad mínima de agua con la enzima, se retiene su actividad en los medios orgánicos. Sin embargo, demasiada agua facilita la agregación enzimática, lo que conduce a una disminución de la actividad enzimática. Se observó un efecto similar en la reacción de metanólisis del aceite de soja con lipasa de *Mucor miehei* y en la reacción de transesterificación de trioleína con propanol por la lipasa *Pseudomonas fluorescens*.

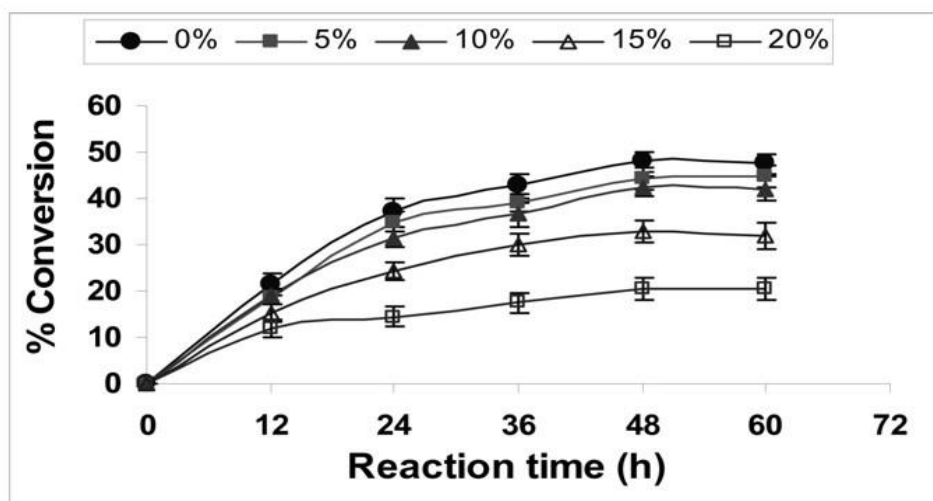


Ilustración 4.3.9. Efecto del contenido de agua adicional

#### 4.3.10. EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL

Condiciones de reacción: relación molar 1: 4 de aceite a metanol, 20 U de lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada, t-butanol: relación de volumen de aceite de 0.8, 55 ° C y 200 rpm. Los datos se representan como media  $\pm$  desviación estándar de la observación por triplicado.

#### 4.3.11. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN ENZIMÁTICA

También se investigó el efecto de la concentración de enzimas en la reacción de transesterificación. La concentración de la enzima varió de 20 a 60 U a una relación molar de aceite de jatropha: metanol 1: 4 y a 55 ° C como se muestra en la siguiente figura. La síntesis de éster metílico de ácido graso aumentó inicialmente con un aumento en la cantidad de enzima con una conversión máxima del 68% a 50 U de lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada, mientras que al aumentar aún más la cantidad de enzima no se observó un aumento significativo en la síntesis de biodiésel. Un estudio anterior demostró que el rendimiento de oleato de 1-butilo aumentó cuando la cantidad de lipasa de *Rhizopus oryzae* aumentó de 30 a 60 U y permaneció casi constante con un aumento en la cantidad de lipasa más allá de 60 U. Se informaron resultados similares para la metanólisis del aceite de salvado de arroz catalizado por *Cryptococcus* spp. S-2 lipasa. Esto puede deberse al hecho de que, en presencia de una gran cantidad de lipasa, el sitio activo no puede exponerse a los sustratos y muchas moléculas de la enzima se agregan juntas. La aglomeración usando lipasas inmovilizadas en un sistema libre de solventes ha sido reportada previamente.



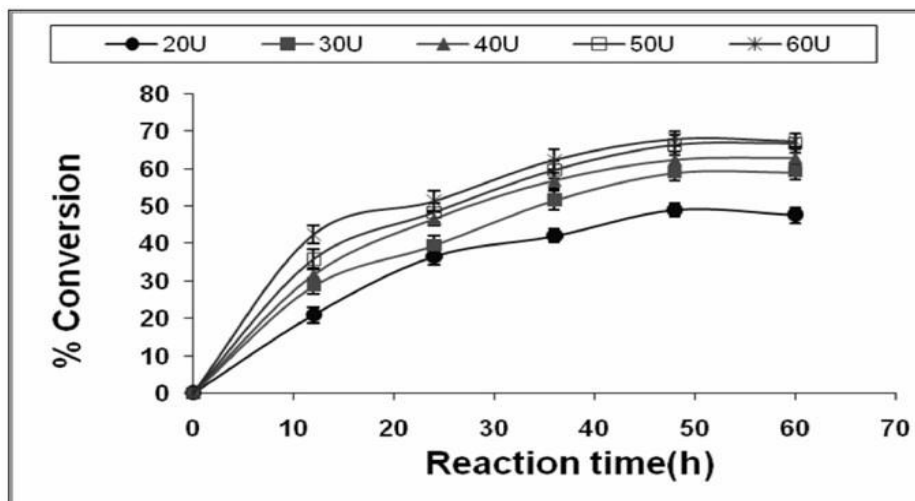


Ilustración 4.3.11. Efecto de la concentración enzimática

#### 4.3.12. EFECTO DE LA CANTIDAD DE ENZIMA EN LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL

Condiciones de reacción: relación molar 1: 4 de aceite a metanol, relación t-butanol: volumen de aceite de 0,8, 55 ° C y 200 rpm. Los datos se representan como media  $\pm$  desviación estándar de la observación por triplicado.

#### 4.3.13. REUSABILIDAD DE LA LIPASA

El uso repetido de enzimas inmovilizadas puede ayudar a reducir el costo del producto y hacer que el proceso enzimático sea económicamente viable. La estabilidad operativa o la reutilización son importantes para determinar la eficiencia enzimática inmovilizada. Sin embargo, se observó que el comportamiento de la reacción cambia cuando una enzima inmovilizada se usa repetidamente. La lipasa inmovilizada se filtró al final de la reacción, se lavó con t-butanol y nuevamente se introdujo con reactivos frescos para estudiar su estabilidad operativa en cada ciclo. No se observó pérdida aparente en la capacidad de síntesis de biodiésel de la lipasa inmovilizada, incluso después de siete ciclos de uso en el sistema t-butanol (ver figura). Esto puede deberse a la presencia de t-butanol en el medio de reacción que reduce drásticamente el glicerol adsorbido en la lipasa inmovilizada, lo que conduce a una mayor estabilidad de la lipasa incluso después de varios usos. Sin embargo, la actividad relativa disminuyó gradualmente al 50% después de 20 ciclos, lo que podría deberse a la pérdida de enzima durante la filtración y el secado (ya que no se agregaron cantidades de maquillaje de la enzima), interacción prolongada del solvente orgánico (t-butanol) con la enzima inmovilizada que resulta en la desnaturalización de la enzima y la producción de cantidades sustanciales de agua coproducida después de cada ciclo. A partir de este estudio, se ha demostrado que la inmovilización de la lipasa en un soporte poroso mediante adsorción física es una técnica útil para mejorar la actividad enzimática a través de la interacción directa con la lipasa, además de protegerla de la inactivación directa por reactivo y producto, lo cual está de acuerdo con lo anterior.

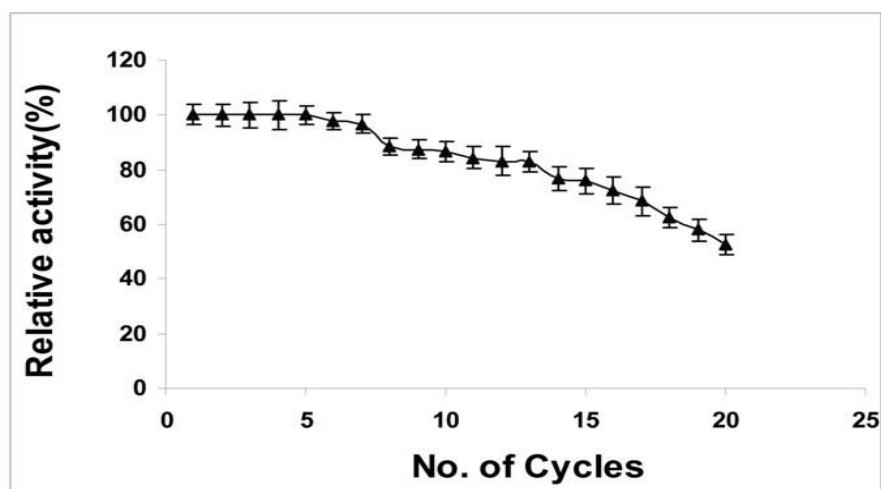


Ilustración 4.3.13. Reusabilidad de la lipasa

#### 4.3.14. ESTABILIDAD OPERATIVA DE LA LIPASA DE *E. AEROGENES* PARA LA SÍNTESIS DE BIODIÉSEL

Condiciones de reacción: relación molar 1: 4 de aceite a metanol, 50 U de lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada, t-butanol: relación de volumen de aceite de 0.8, 55 ° C y 200 rpm. Los datos se representan como media  $\pm$  desviación estándar de la observación por triplicado.

#### 4.3.15. PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE DE LOS ÉSTERES METÍLICOS DE ACEITE DE JATROPHA

Los resultados actuales mostraron que el proceso de transesterificación mejoró las propiedades de combustible del aceite con respecto a la viscosidad, el punto de inflamación y el punto de fluidez. La comparación de estas propiedades con el diésel mostró que el éster metílico tiene valores de propiedad de combustible relativamente más cercanos a los del estándar de biodiésel. Hay una disminución sustancial en la viscosidad en comparación con la del aceite de Jatropha, aunque la viscosidad del biodiésel Jatropha fue ligeramente mayor que el rango estándar de viscosidad del biodiésel. Además, generalmente el biodiésel mezclado con diésel se usa como combustible, por lo que no se requerirán modificaciones de hardware para manejar este combustible (mezclas de diésel) en el motor existente. El punto de inflamación del aceite de Jatropha se reduce por transesterificación, pero aún es más alto que el del diésel. Por lo tanto, un pequeño porcentaje de adición de biodiésel con diésel aumenta el punto de inflamación del diésel. Por lo tanto, es más seguro almacenar mezclas de biodiésel-diésel en comparación con el diésel solo. Se descubrió que las propiedades probadas de los ésteres metílicos del aceite de Jatropha están razonablemente de acuerdo con ASTM 6751 y EN 14214.

## 4.4. CONCLUSIONES

El presente estudio muestra que la metanólisis eficiente del aceite de Jatropha es posible mediante catálisis con lipasa en presencia de t-butanol como disolvente. El presente trabajo es un estudio exhaustivo sobre los parámetros de reacción que influyen en la síntesis enzimática del biodiésel. La lipasa de *E. aerogenes* inmovilizada se empleó para catalizar la reacción de transesterificación. Se encontró que la cantidad de enzima y temperatura tienen un efecto inmenso en la síntesis de biodiésel. La conversión aumentó al aumentar la temperatura hasta 55 ° C, que estaba cerca del punto de ebullición de la mezcla de reacción. Se obtuvo aproximadamente un 94% de rendimiento de biodiésel (de los cuales se logró una conversión del 68% con respecto al oleato de metilo) utilizando 50 U de *E. aerogenes* inmovilizados de lipasa con relación molar 1: 4 de aceite a metanol a 55 ° C durante 48 h. La alta estabilidad operativa de la lipasa inmovilizada también indica la eficiencia del proceso. A partir del presente trabajo, se ha demostrado

que la metanólisis del aceite de *Jatropha* podría llevarse a cabo de manera efectiva en este nuevo sistema con una buena estabilidad operativa de las lipasas. Sin embargo, es necesaria una mayor investigación y desarrollo sobre medidas adicionales de propiedad de combustible, funcionamiento a largo plazo y análisis de desgaste de motores alimentados con biodiesel.

# **BLOQUE V: APLICACIÓN DEL BIODIÉSEL DE JATROPHA CURCAS EN MOTORES DIÉSEL**

---

## **1 PROPIEDADES Y USO DE LAS MEZCLAS DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS Y DIÉSEL EN EL MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN**

---

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

De estudios previos, es evidente que existen varios problemas asociados con el uso de aceites vegetales como combustible en motores de encendido por compresión (CI), principalmente debido a su alta viscosidad. La alta viscosidad se debe a la gran masa molecular y estructura química de los aceites vegetales, lo que a su vez genera problemas de bombeo, combustión y atomización en los sistemas de inyección de un motor diésel. Debido a la alta viscosidad, en la operación a largo plazo, los aceites vegetales normalmente introducen el desarrollo de engomado, la formación de depósitos en el inyector, la adherencia del anillo, así como la incompatibilidad con los aceites lubricantes convencionales. Por lo tanto, una reducción en la viscosidad es de primordial importancia para hacer de los aceites vegetales un combustible alternativo adecuado para motores diésel. El problema de la alta viscosidad de los aceites vegetales se ha abordado de varias maneras, como precalentar los aceites, mezclarlos o diluirlos con otros combustibles, transesterificación y craqueo térmico / pirólisis.

En la presente investigación, el aceite de jatropha curcas, considerado como un posible combustible alternativo para los motores de CI, ha sido elegido para determinar su idoneidad para su uso como combustible.

El aceite de jatropha es un aceite de secado lento que es inodoro e incoloro cuando está fresco, pero se vuelve amarillo al reposar. El contenido de aceite de la semilla de jatropha varía del 30 al 50% en peso y el grano en sí varía del 45 al 60%. La composición de ácidos grasos de la jatropha lo clasifica como un tipo de ácido linoleico u oleico, que son ácidos grasos insaturados. La composición de ácidos grasos del aceite de jatropha consiste en ácidos mirístico, palmítico, esteárico, araquídico, oleico y linoleico. Las semillas y el aceite son tóxicos debido a la presencia de curciva y curca. Sin embargo, a partir de las propiedades de este aceite, se prevé que el aceite sería adecuado como combustible. El aceite se compara bien con otros aceites vegetales y, lo que es más importante, con el diésel en términos de su clasificación de combustible por kilogramo o hectárea de aceite producido. Pero la mayor diferencia entre el aceite de jatropha y el diésel es la viscosidad. La alta viscosidad de este aceite puede contribuir a la formación de depósitos de carbono en los motores, a la combustión incompleta del combustible y a la reducción de la vida útil del motor.

Por lo tanto, el objetivo principal del presente estudio fue disminuir la viscosidad del aceite de jatropha curcas por dilución con diésel, ver el efecto del calentamiento en la reducción de las viscosidades de las mezclas y evaluar el rendimiento del motor utilizando las mezclas preparadas como combustible.

## **1.2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para este estudio se requiere aceite de jatropha y aceite diésel. De estudios previos, es evidente que existen varios problemas asociados con el uso de aceites vegetales como combustible en motores de encendido por compresión (CI), principalmente debido a su alta viscosidad. La alta viscosidad se debe a la gran masa molecular y estructura química de los aceites vegetales, lo que a su vez genera problemas de bombeo, combustión y atomización en los sistemas de inyección de un motor diésel. Debido a la alta viscosidad, en la operación a largo plazo, los aceites vegetales normalmente introducen el desarrollo de engomado, la formación de depósitos en el inyector, la adherencia del anillo, así como la incompatibilidad con los aceites lubricantes convencionales. Por lo tanto, una reducción en la viscosidad es de primordial importancia para hacer de los aceites vegetales un combustible alternativo adecuado para motores diésel. El problema de la alta viscosidad de los aceites vegetales se ha abordado de varias maneras, como precalentar los aceites, mezclarlos o diluirlos con otros combustibles, transesterificación y craqueo térmico / pirólisis.

En la presente investigación, el aceite de jatropha curcas, considerado como un posible combustible alternativo para los motores de CI, ha sido elegido para determinar su idoneidad para su uso como combustible.

El aceite de jatropha es un aceite de secado lento que es inodoro e incoloro cuando está fresco, pero se

vuelve amarillo al reposar. El contenido de aceite de la semilla de jatropha varía del 30 al 50% en peso y el grano en sí varía del 45 al 60%. La composición de ácidos grasos de la jatropha lo clasifica como un tipo de ácido linoleico u oleico, que son ácidos grasos insaturados. La composición de ácidos grasos del aceite de jatropha consiste en ácidos mirístico, palmítico, esteárico, araquídico, oleico y linoleico. Las semillas y el aceite son tóxicos debido a la presencia de curciva y curca. Sin embargo, a partir de las propiedades de este aceite, se prevé que el aceite sería adecuado como combustible. El aceite se compara bien con otros aceites vegetales y, lo que es más importante, con el diésel en términos de su clasificación de combustible por kilogramo o hectárea de aceite producido. Pero la mayor diferencia entre el aceite de jatropha y el diésel es la viscosidad. La alta viscosidad de este aceite puede contribuir a la formación de depósitos de carbono en los motores, a la combustión incompleta del combustible y a la reducción de la vida útil del motor.

Por lo tanto, el objetivo principal del presente estudio fue disminuir la viscosidad del aceite de jatropha curcas por dilución con diésel, ver el efecto del calentamiento en la reducción de las viscosidades de las mezclas y evaluar el rendimiento del motor utilizando las mezclas preparadas como combustible.

Para este estudio se requiere aceite de jatropha y aceite diésel.

### 1.2.1. PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE

Las importantes propiedades químicas y físicas del aceite de jatropha curcas se determinaron mediante métodos estándar y se compararon con el diesel. Los resultados analíticos se muestran en la siguiente tabla. Los resultados muestran que el valor de calentamiento del aceite vegetal es comparable al aceite diésel y, el número de cetano es ligeramente más bajo que el combustible diésel. Sin embargo, la viscosidad cinemática y el punto de inflamación del aceite de jatropha curcas son varias veces más altos que el diésel.

Propiedades	Diesel	Jatropha aceite de curcas
Densidad (gm / cc), 30 ° C	0.836–0.850	0.93292
Viscosidad cinemática (cSt), 30 ° C	4–8	52,76
Cetano No.	40-55	38,00
Punto de inflamación, ° C	45-60	210,00

Propiedades	Diesel	Jatropha aceite de curcas
Valor calorífico, MJ / kg	42-46	38,20
Valor de saponificación	-	198,00
Yodo No.	-	94,00

Tabla 1.2.1. Propiedades físicas y químicas de la mezcla de diésel y aceite de jatropha

### 1.2.2. PREPARACIÓN DE MEZCLA DE JATROPHA Y DIÉSEL

De la literatura, es evidente que la dilución o mezcla de aceite vegetal con otros combustibles como el alcohol o el combustible diésel acercaría la viscosidad a un rango de especificación. Por lo tanto, el aceite de jatropha se mezcló con aceite diésel en proporciones variables con la intención de reducir su viscosidad cerca de la del combustible diésel. Las importantes propiedades físicas y químicas del biodiesel así preparado se dan en la tabla. Las diversas mezclas fueron estables en condiciones normales.

% de aceite de J. curcas (v / v)	% de combustible diesel (v / v)	Densidad (g / cc), 30 ° C	Viscosidad (cSt), 30 ° C	Reducción de viscosidad (%)	Observación
70	30	0.900	23,447	55,56	Mezcla estable
60	40	0.890	19,222	62,13	Mezcla estable
50	50	0.853	17.481	66,86	Mezcla estable
40	60	0.880	13,953	73,55	Mezcla estable
30	70	0.871	9,848	81,00	Mezcla estable
20	80	0.862	6,931	86,86	Mezcla estable

### **1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **1.3.1. EFECTO DE LA DILUCIÓN SOBRE LA VISCOSIDAD DEL ACEITE VEGETAL Y BIODIÉSEL**

Se ha visto en la tabla 2 que la alta viscosidad del aceite de jatropha curcas se ha reducido drásticamente por la sustitución parcial de aceite diésel. La viscosidad del aceite vegetal disminuyó al aumentar el contenido de diésel en la mezcla. Aunque se observó una disminución sustancial en la viscosidad y la densidad con 70:30 jatropha / diésel (J / D) y 60:40 J / D mezclas, la viscosidad y la densidad son bastante más altas que las del diésel. Se obtuvo una reducción de la viscosidad de 55.56% y 62.13% con mezclas de 70:30 y 60:40 J / D, respectivamente. Se encontró que la viscosidad y la densidad correspondientes eran 23.447 y 19.222 cSt, y 0.900 y 0.890 g / cc a 30 ° C. La viscosidad y la densidad del aceite de jatropha curcas se redujeron de 52.76 y 0.93292 a 17.481 cSt y 0.880 g / cc, respectivamente, con una mezcla 50:50 J / D. Se logró una reducción de la viscosidad del 66,86%. La viscosidad de la mezcla 40:60 J / D fue ligeramente mayor que la del diésel. En este caso, se encontró que la viscosidad era de 13.958 cSt y la reducción porcentual de la viscosidad fue de 73.55, mientras que la viscosidad y la densidad de las mezclas que comprenden 30:70 y 20:80 J / D son cercanas a las del aceite diésel. Se observó una viscosidad de 9.848 y 6.931 cSt y una densidad de 0.862 y 0.853 g / cc con 30:70 y 20:80 J / D, respectivamente. Las reducciones de viscosidad correspondientes fueron 81 y 86.86%. Por lo tanto, se puede agregar 70–80% de diésel al aceite de jatropha para acercar la viscosidad al combustible diésel y, por lo tanto, las mezclas que contienen 20-30% de aceite de jatropha se pueden usar como combustible del motor sin precalentamiento mientras que la viscosidad y la densidad de las mezclas que comprenden 30:70 y 20:80 J / D son cercanas a las del petróleo diésel. Se observó una viscosidad de 9.848 y 6.931 cSt y una densidad de 0.862 y 0.853 g / cc con 30:70 y 20:80 J / D, respectivamente. Las reducciones de viscosidad correspondientes fueron 81 y 86.86%. Por lo tanto, se puede agregar 70-80% de diésel al aceite de jatropha para acercar la viscosidad al combustible diésel y, por lo tanto, las mezclas que contienen 20-30% de aceite de jatropha se pueden usar como combustible del motor sin precalentamiento mientras que la viscosidad y la densidad de las mezclas que comprenden 30:70 y 20:80 J / D son cercanas a las del petróleo diésel. Se observó una viscosidad de 9.848 y 6.931 cSt y una densidad de 0.862 y 0.853 g / cc con 30:70 y 20:80 J / D, respectivamente. Las reducciones de viscosidad correspondientes fueron 81 y 86.86%. Por lo tanto, se puede agregar 70–80% de diésel al aceite de jatropha para acercar la viscosidad al combustible diésel y, por lo tanto, las mezclas que contienen 20-30% de aceite de jatropha se pueden usar como combustible del motor sin precalentamiento.



### 1.3.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VISCOSIDAD DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS Y VARIAS MEZCLAS

A partir de las propiedades de las mezclas que se muestran en la tabla 1.2.2, se ha observado que el biodiesel que contiene más del 30% de aceite de jatropha tiene una alta viscosidad en comparación con el diésel. La viscosidad de estas mezclas necesitaba reducirse más para hacerla adecuada como biodiésel para ser utilizada en el motor diésel. De la literatura, se descubrió que calentar el combustible hace que sus características de pulverización se parezcan más a las del petróleo diésel, que es el resultado directo de la reducción de la viscosidad. Por lo tanto, se han hecho esfuerzos para disminuir la viscosidad calentando los biodiésel. Para esto, las viscosidades de los aceites, así como las mezclas, se midieron a temperatura variable en el rango de 25-75 ° C. Los resultados se muestran en la siguiente figura. Los resultados muestran que la viscosidad del aceite de jatropha es más alta que el diésel en cualquier temperatura. Sin embargo, la viscosidad del aceite vegetal disminuyó notablemente al aumentar la temperatura y se acerca al aceite diésel a temperaturas superiores a 75 ° C. El biodiesel que contiene 70 y 60% de aceite vegetal tiene una viscosidad cercana al diésel entre 70 y 75 ° C, y entre 60 y 65 ° C, respectivamente. Los valores de viscosidad de 50:50 J / D y 40:60 J / D están cerca del diésel en el rango de 55-60 ° C y a aproximadamente 45 ° C, respectivamente, mientras que la mezcla que contiene 30:70 J / D tiene viscosidad cerca del diésel en el rango de 35-40 ° C. Por lo tanto, las mezclas de 30:70 y 40:70 J / D pueden usarse con un ligero calentamiento o incluso sin calentamiento, particularmente en la temporada de verano.

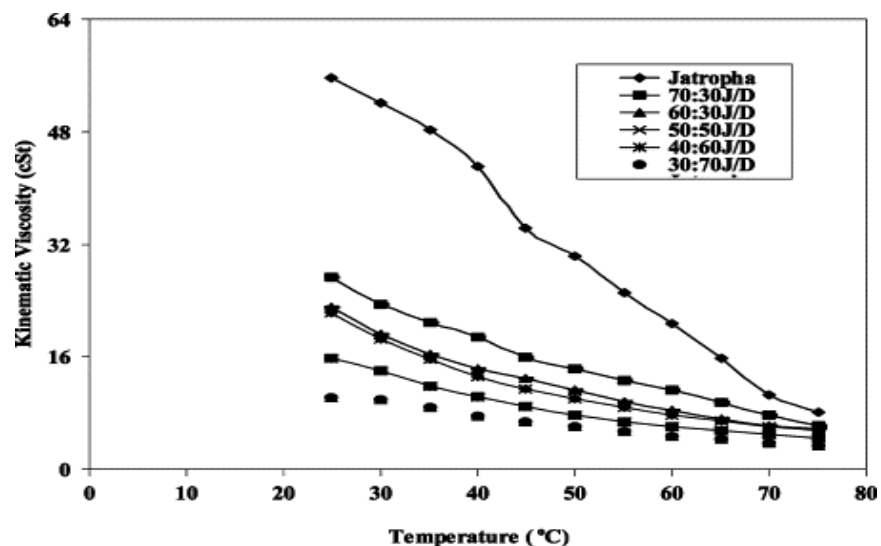


Ilustración 1.3.2. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad del aceite de jatropha y diversas mezclas

## 1.4. PRUEBA DEL MOTOR

### 1.4.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron pruebas de velocidad constante del motor utilizando mezclas J / D, aceite de jatropha curcas y diésel, y se evaluó el rendimiento del motor en términos de consumo específico de combustible, eficiencia térmica de los frenos y temperatura de los gases de escape. El motor utilizado en estos experimentos fue un motor de fabricación Kirloskar. Este es un motor diésel monocilíndrico, con cámara de combustión abierta refrigerado por agua. Los detalles técnicos del motor se dan en la tabla. Los diversos equipos / instrumentos utilizados en la experimentación se presentan a continuación.

---

Hacer	Kirloskar Oil Engines Ltd, India
Tipo	Motor CI de cámara de combustión abierta monocilindro
Salida nominal	3,68 kW a 1500 rpm
Tiempo de inyección	26.4 BTDC
Dispositivo de carga	Dinamómetro hidráulico
Carrera	110 mm
Índice de compresión	15: 1

Tabla 1.4.1. Detalles técnicos del motor

Un transductor de presión de cuarzo se fija en el cilindro del motor y se conecta al osciloscopio del canal Y a través de un amplificador de carga para medir la tasa de aumento de presión y la presión máxima. Se fija una captación magnética cerca del volante del motor y se conecta al canal X del osciloscopio de rayos catódicos para determinar la posición del TDC. Se utiliza un osciloscopio HM 204 de 20 MHz para la visualización del diagrama P – O. Un amplificador de carga Tipo 5007 convierte el rendimiento de carga del transductor piezoeléctrico en señales eléctricas proporcionales. El motor se probó a un par de 0-243 rpm y a la velocidad nominal de 1500 rpm solamente. El motor se calentó lo suficiente en cada etapa y la temperatura del agua fría se mantuvo a 55 ° C. La presión de inyección de combustible se mantuvo a 210 bar durante todo el experimento.

## 1.5. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MOTOR Y DISCUSIÓN

### 1.5.1. EFECTO DE LA POTENCIA DE FRENADO (BKW) EN EL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE (SFC)

La siguiente figura compara el consumo específico de combustible del diésel y varias mezclas de jatropa y diésel en diferentes cargas de freno en el rango de 0 a 3.74. Se observó que los consumos específicos de combustible del aceite, así como las mezclas, disminuyeron al aumentar la carga de 0.77 a 3.078 y tendieron a aumentar con un aumento adicional en BKW. Los consumos de combustible también aumentaron con una mayor proporción de aceite de jatropa curcas en la mezcla. Aunque las mezclas, así como el aceite de jatropa curcas mantuvieron una tendencia similar a la del diésel, el SFC en el caso de las mezclas fue más alto en comparación con el diésel en todo el rango de carga. Esto se debe principalmente a los efectos combinados de la densidad relativa del combustible, la viscosidad y el valor de calentamiento de las mezclas. Sin embargo, las mezclas que contienen 30:70 y 40:60 J / D tienen un SFC muy cercano al del diésel. Se encontró que los valores de SFC eran 0.338 y 0.365 a 3.078 BKW; el valor correspondiente para diésel es 0.316. El consumo específico de combustible de 0.693 se observó utilizando una mezcla 50:50 J / D como combustible, que es comparable al SFC obtenido con diésel bajo la misma carga. La mayor densidad de las mezclas que contienen un mayor porcentaje de aceite de jatropa curcas ha llevado a una mayor descarga de combustible por el mismo desplazamiento del émbolo en la bomba de inyección de combustible, aumentando así el SFC.

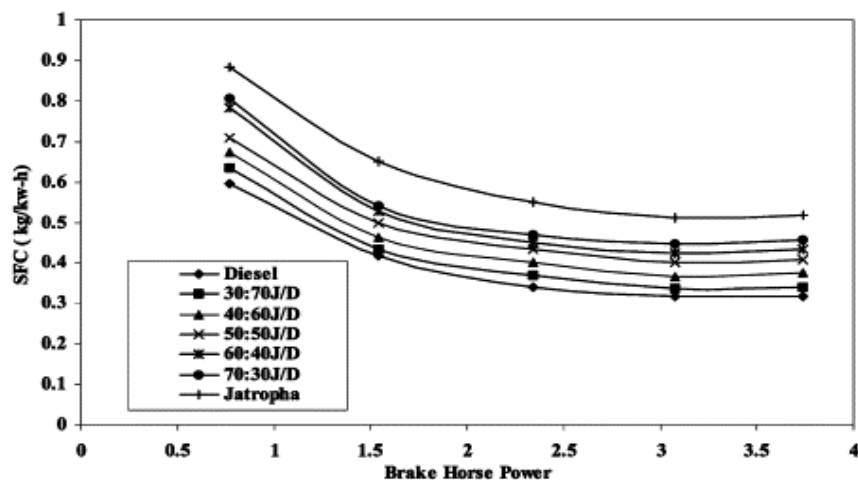


Ilustración 1.5.1. Efecto de la potencia de frenado en el consumo de combustible específico para diésel, aceite de jatropa curcas y varias mezclas

## 1.5.2. EFECTO DE BKW EN LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL FRENO

La siguiente figura muestra la variación de la eficiencia térmica del freno del motor con varias mezclas J / D y aceite vegetal de jatropha curcas en comparación con la eficiencia térmica del freno obtenida con diésel. A partir de los resultados de la prueba, se observó que inicialmente con el aumento de BKW las eficiencias térmicas del freno del aceite vegetal, el diésel y las mezclas aumentaron y las eficiencias térmicas máximas se obtuvieron en BKW de 3.078 y luego tendieron a disminuir con un aumento adicional de BKW. Hubo un aumento considerable en las eficiencias con las mezclas en comparación con la eficiencia del aceite de jatropha solo, pero las eficiencias térmicas del freno de las mezclas y el aceite de jatropha curcas fueron inferiores a las del combustible diésel en toda la gama. Los valores máximos de eficiencia térmica con 60:30 y 70:30 J / D se observaron como 21.45% y 20.53%, respectivamente. Entre las mezclas probadas, en el caso de 30:70 J / D, La eficiencia térmica y la potencia máxima de salida estuvieron cerca de los valores del diésel, seguidos por la mezcla 40:60 J / D. Se observaron eficiencias térmicas de freno máximas correspondientes de 26.09 y 24.36% con estas mezclas. También se observó una eficiencia térmica razonablemente buena del 22,44% con la mezcla 50:50 J / D. La eficiencia térmica máxima del 27,11% se logró con diésel, mientras que solo se observó una eficiencia térmica del 18,52% con aceite de jatropha curcas. La caída en la eficiencia térmica con el aumento en la proporción de aceite vegetal debe atribuirse a las pobres características de combustión de los aceites vegetales debido a su alta viscosidad y baja volatilidad. También se observó 44% con la mezcla 50:50 J / D. La eficiencia térmica máxima del 27.11% se logró con diésel, mientras que solo se observó una eficiencia térmica del 18.52% usando aceite de jatropha curcas. La caída en la eficiencia térmica con el aumento en la proporción de aceite vegetal debe atribuirse a las pobres características de combustión de los aceites vegetales debido a su alta viscosidad y baja volatilidad. También se observó 44% con la mezcla 50:50 J / D. La eficiencia térmica máxima del 27,11% se logró con diésel, mientras que solo se observó una eficiencia térmica del 18,52% con aceite de jatropha curcas. La caída en la eficiencia térmica con el aumento en la proporción de aceite vegetal debe atribuirse a las pobres características de combustión de los aceites vegetales debido a su alta viscosidad y baja volatilidad.

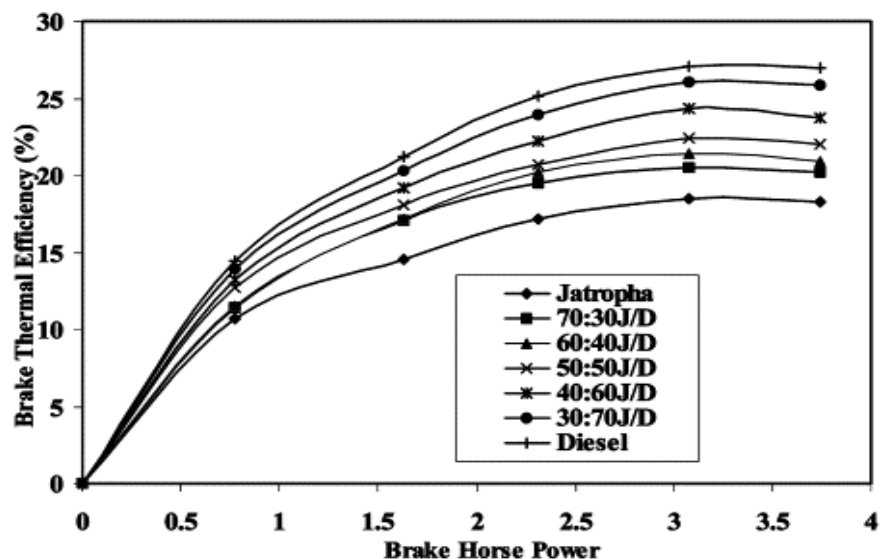


Ilustración 1.5.2. Variación de la eficiencia térmica del freno con potencia de frenado para diésel, aceite de jatropha curcas y varias mezclas

### 1.5.3. EFECTO DE BKW SOBRE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE

La siguiente figura muestra la variación de la temperatura de los gases de escape con carga en el rango de 0–3.74 BKW para diésel, aceite de jatropha curcas y varias mezclas. Los resultados muestran que la temperatura de los gases de escape aumentó con el aumento de BKW en todos los casos. El valor más alto de la temperatura del gas de escape de 554 ° C se observó con el aceite de jatropha, mientras que el valor correspondiente con el diésel fue de 425 ° C solamente. Esto se debe a las malas características de combustión del aceite de jatropha curcas debido a su alta viscosidad. Las características de combustión de las mezclas mejoraron al aumentar la proporción de combustible diésel en la mezcla J / D. Se observó que la temperatura de los gases de escape para 20:80 J / D era muy cercana al diésel y las temperaturas eran comparables a las de las mezclas de diésel con 30:70 y 40:60 J / D en toda la carga. La temperatura máxima de escape se registró como 550 y 540 ° C con mezclas de 70:30 y 60:40 J / D, respectivamente a 3.74 BKW. Con 50:50 J / D, se encontró que el valor era 535 ° C. Con las mezclas que contenían 40:60 y 30:70 J / D, se demostró que las temperaturas máximas de escape respectivas eran 505 y 475 ° C, que son ligeramente más altas que la temperatura de escape lograda usando combustible diésel en el motor. Se descubrió que la temperatura de escape era de 435 con una mezcla de 20:80 J / D que está muy cerca de la del aceite diésel. Se encontró que la temperatura de escape con las mezclas que tienen un mayor porcentaje de aceite de jatropha curcas es mayor a toda la carga en comparación con el diésel, pero se observó que la desviación era mayor a un BKW más alto, particularmente por encima de 2,32. La temperatura de escape más alta con mezclas que contienen más del 50% v de aceite de jatropha es indicativa de menores eficiencias térmicas del motor. Con una eficiencia térmica más baja, menos energía de entrada en el combustible se convierte en trabajo, lo que aumenta la temperatura de escape.

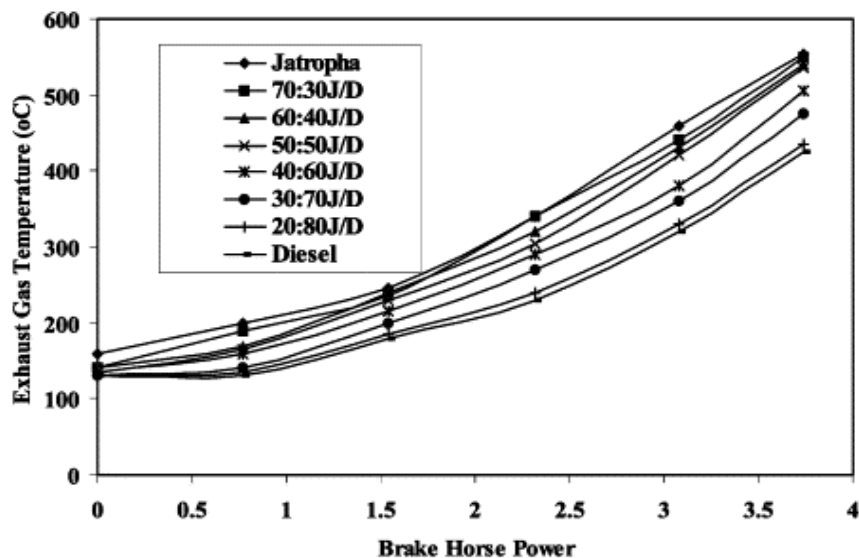


Ilustración 1.5.3. Efecto de la potencia de frenado sobre la temperatura de los gases de escape del diésel, el aceite de jatropha curcas y varias mezclas

## 1.6. CONCLUSIONES

El objetivo principal de la presente investigación fue reducir la viscosidad del aceite de jatropha curcas cerca de la del combustible convencional para que sea adecuado para su uso en un motor CI y para evaluar el rendimiento del motor con los aceites modificados. Se logró una reducción significativa en la viscosidad por dilución de aceite vegetal con diésel en proporciones variables. Entre las diversas mezclas, las mezclas que contienen hasta un 30% (v / v) de aceite de jatropha tienen valores de viscosidad cercanos a los del combustible diésel. La mezcla que contiene 40% (v / v) de aceite vegetal tiene una viscosidad ligeramente mayor que la del diésel. La viscosidad se redujo adicionalmente calentando las mezclas. La viscosidad de las mezclas que contienen 70 y 60% de aceite vegetal se acercó a la del diésel en los rangos de temperatura de 70-75 y 60-65 ° C, respectivamente. Se encontró que las temperaturas correspondientes eran 55-60 y 45 ° C para mezclas de 50 y 40%, mientras que solo a 35-40 ° C la viscosidad de la mezcla 30:70 J / D se acercó al rango de especificación. Se lograron eficiencias térmicas de freno y SFC aceptables con las mezclas que contenían hasta un 50% de aceite de jatropha. Las mezclas con un menor porcentaje de aceites vegetales mostraron temperaturas de gases de escape ligeramente más altas en comparación con un motor que funciona con diésel, pero en todos los casos fueron mucho más bajas que el aceite de jatropha curcas. Por lo tanto, a partir de los resultados de la prueba del motor, se ha establecido que hasta un 50% de aceite de jatropha curcas se puede sustituir por diésel para su uso en un motor CI sin mayores dificultades operativas. Sin embargo, Las propiedades de las mezclas pueden mejorarse aún más para utilizar un mayor porcentaje de aceite de jatropha en la mezcla usando aceite de jatropha de grado más puro que puede obtenerse mediante el pretratamiento del aceite. Además, la durabilidad a largo plazo del motor que utiliza biodiésel como combustible requiere más estudio.

# 2 ANÁLISIS DE COMBUSTIÓN DE BIODIESEL A BASE DE JATROPHA, KARANJA Y POLANGA COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DIÉSEL

---

## 2.1. INTRODUCCIÓN

El concepto de usar biocombustibles en motores diésel se originó a partir de la demostración del primer motor diésel por el inventor del motor diésel " *Rudolf Diesel* " en la Exposición Mundial de París en 1900 utilizando aceite de maní como combustible. Sin embargo, debido al abundante suministro de petrodiesel, las actividades de I + D en aceite vegetal no se llevaron a cabo seriamente. Recibió atención recientemente cuando se dio cuenta de que los combustibles derivados del petróleo estaban disminuyendo rápidamente, y se deben identificar sustitutos renovables amigables con el medio ambiente. En los últimos años, varios investigadores han realizado grandes esfuerzos para utilizar diferentes fuentes de energía como combustible en los motores diésel existentes. El uso de aceites vegetales simples está restringido por algunas propiedades físicas desfavorables, particularmente su viscosidad. Debido a la mayor viscosidad, el aceite vegetal puro causa una atomización deficiente del combustible, una combustión incompleta y una deposición de carbono en el inyector y los asientos de las válvulas, lo que da como resultado graves incrustaciones en el motor. Se ha informado que cuando los motores de inyección directa funcionan con aceite vegetal puro como combustible, los inyectores se ahogan después de unas pocas horas y conducen a una atomización de combustible deficiente, una combustión menos eficiente y la dilución del aceite lubricante por aceite vegetal parcialmente quemado. Un posible método para superar el problema de una mayor viscosidad es mezclar aceite vegetal con diésel en la proporción adecuada, y el otro método es la transesterificación de aceites para producir biodiesel.

Se informó que el proceso de transesterificación ha sido probado en todo el mundo como un medio eficaz de producción de biodiesel y reducción de la viscosidad del aceite vegetal. Se ha observado que las temperaturas, el tipo de catalizador, la relación de concentración de alcohol a combustible y la velocidad de agitación influyen en mayor medida en el proceso de transesterificación. Se realizó un breve estudio sobre el uso de biodiesel del aceite de coco (mezcla 50/50), "B50" en autocares. Este estudio reveló que es un combustible alternativo viable y práctico para motores en servicio más antiguos. El material particulado era casi insignificante con el uso de este combustible. Los operadores informaron que los vehículos de prueba no tenían inconvenientes de conducción notables. Por otro lado, se observó que los vehículos tenían un

rendimiento de potencia mejorado mientras operaban en condiciones de tráfico de la ciudad.

También se descubrió que no se informaron problemas significativos del motor en las pruebas con flotas de autobuses urbanos en B20. La economía de combustible era comparable con el combustible diésel y el consumo de combustible de la mezcla de biodiesel es solo un 2-5% más alto que el del diésel convencional. Se ha informado que las mezclas de ésteres son estables y no se separaron a temperatura ambiente durante un período de tres meses. Una limitación para el uso de biodiesel es su tendencia a cristalizar a bajas temperaturas por debajo de 0 ° C. Tales cristales pueden obstruir las líneas y los filtros de combustible, causando problemas en el bombeo de combustible y el funcionamiento del motor. Wagner y col. realizó 200 h de pruebas del motor con combustible de éster de aceite de soja en el motor John Deere (modelo 4239T). Se informó que el rendimiento del motor con ésteres de metilo, etilo y butilo era casi el mismo que con el combustible diésel. No hubo diferencia en la eficiencia térmica resultante del uso de varios combustibles para alimentar el motor. Los ésteres mostraron una ligera pérdida de potencia y un mayor consumo de combustible, que se atribuyó a los valores de calentamiento bruto más bajos. El desgaste del motor fue normal. Sin embargo, hubo un aumento de la deposición de carbono en los pistones con los ésteres de metilo y butilo. Las emisiones de óxidos de nitrógeno fueron significativamente mayores para los ésteres. Llegaron a la conclusión de que los ésteres podrían usarse a corto plazo y que se realizarían más pruebas para determinar los efectos del combustible de éster a largo plazo.

Las experiencias con diésel indican que un aumento en la viscosidad del combustible generalmente resulta en un aumento en la penetración de la pulverización y una disminución en el ángulo de pulverización. Un estudio de Ryan y Bagby descubrió que los aceites vegetales (maní, girasol, algodón y aceites de soya) presentan características opuestas a las esperadas en la mayoría de los otros combustibles fósiles. Observaron una menor penetración y un mayor ángulo de pulverización a pesar de sus mayores viscosidades. Al usar el método de recolección de muestras, concluyeron que la reacción química juega un papel importante en el aumento del proceso de atomización del aceite vegetal durante el proceso de inyección, lo que lleva a un retraso de ignición más corto. Además del problema de la escasez de diésel y los mayores costos de combustible, existe la amenaza creciente de la contaminación vehicular. Para compensar la escasez de combustible diésel, la adaptación de un combustible alternativo seleccionado para adaptarse al motor diésel se considera más atractiva económicamente a corto plazo que la modificación del motor para adaptarse al combustible. Para este propósito, se requiere un combustible líquido alternativo que se mezcle fácilmente con el combustible diésel. Tal combustible alternativo debería prestarse a la producción local en cantidades adecuadas y económicas. Debería haber pequeñas modificaciones en el motor existente. El rendimiento y la durabilidad del motor no deberían verse afectados significativamente. Por lo tanto, existe una mayor motivación para utilizar biodiesel como combustible suplementario para diésel en motores de encendido por compresión. Es extremadamente relevante en este contexto evaluar las características de



combustión del motor alimentado con biodiesel. El objetivo específico de este estudio es analizar las características de combustión del biodiesel del aceite de Jatropha, Karanja y Polanga y sus mezclas con diésel; e investigar su idoneidad como combustible en motores diésel. Es extremadamente relevante en este contexto evaluar las características de combustión del motor alimentado con biodiesel. El objetivo específico de este estudio es analizar las características de combustión del biodiesel del aceite de Jatropha, Karanja y Polanga y sus mezclas con diésel; e investigar su idoneidad como combustible en motores diésel. Es extremadamente relevante en este contexto evaluar las características de combustión del motor alimentado con biodiesel. El objetivo específico de este estudio es analizar las características de combustión del biodiesel del aceite de Jatropha, Karanja y Polanga y sus mezclas con diésel; e investigar su idoneidad como combustible en motores diésel.

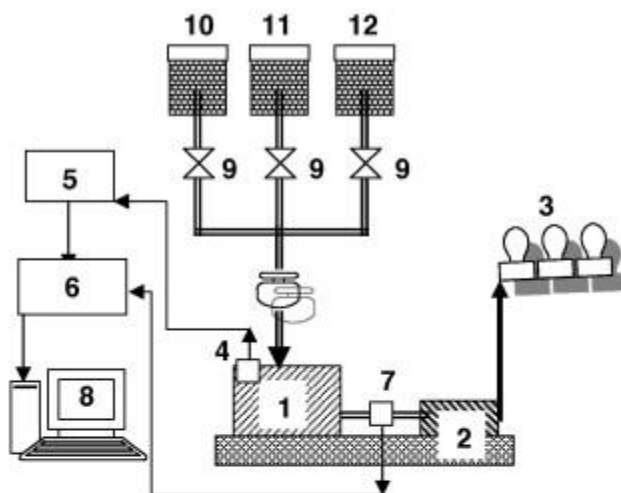
## **2.2. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL PARA ESTUDIO DE COMBUSTIÓN**

El biodiesel de Jatropha, Karanja y Polanga se produjo en una configuración a escala de laboratorio, que consiste en un manto calefactor, un matraz de reacción y un agitador mecánico. La capacidad de trabajo del matraz de reacción es de 5 l. Consiste en tres cuellos para agitador, condensador y una entrada de reactivo, así como para colocar el termopar para observar la temperatura de reacción. El matraz tiene una llave de paso en la parte inferior para la recolección del producto final. Se optimizaron los parámetros del proceso, como el modo de la condición de reacción, la relación molar de alcohol a aceite, el tipo de alcohol, el tipo y la cantidad de catalizadores, el tiempo y la temperatura de reacción y la pureza de los reactivos. Un proceso de dos pasos 'ácido-base'; pretratamiento con ácido seguido de reacción de transesterificación de base principal; utilizando metanol como reactivo y  $H_2SO_4$  y KOH como catalizadores para reacciones ácidas y básicas, respectivamente, se siguieron para producir biodiesel a partir de aceite de Polanga. Se adoptó la transesterificación catalizada por una sola base para el aceite de Jatropha y Karanja. Las propiedades fisicoquímicas del biodiésel a base de aceite de Jatropha, Karanja y Polanga (B100) y sus diversas mezclas con diésel se evaluaron según las normas ASTM. Los datos de las propiedades del combustible de los ésteres metílicos de aceite de Jatropha, Karanja y Polanga y sus diferentes mezclas con diésel se resumen en forma de tabla como se muestra en la tabla 1.

## **2.3. TECNOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN**

Las investigaciones sobre las características de la combustión se llevaron a cabo en un pequeño motor diésel de cuatro tiempos y cuatro cilindros refrigerado por aire de 6 kW alimentado con combustibles de prueba

preparados. Se calculó la configuración experimental (ver figura) equipada con tecnologías experimentales para medir los parámetros de combustión, como la presión máxima, el tiempo de ocurrencia de la presión máxima, la tasa de liberación de calor y el retraso de ignición.



1. Single cylinder 4-stroke diesel engine, 6 kW	7. Magnetic pickup (Encoder)
2. Alternator	8. Data acquisition computer
3. AC shunt lamp load	9. Control valve
4. Pressure transducer	10. Fuel tank for neat diesel
5. Charge amplifier	11. Fuel tank for blends of diesel and biodiesel
6. Cathode Ray Oscilloscope (CRO)	12. Fuel tank for neat biodiesel

Ilustración 2.3. Diagrama esquemático de la configuración de prueba para el estudio de combustión

La plataforma de prueba experimental consiste en el motor junto con el alternador y varios sistemas de medición. El motor se le proporcionó una disposición adecuada, que permitió una amplia variación de los parámetros de control. El alternador se utilizó para cargar el motor. Cuando se encendió el banco de carga, consumió la electricidad generada por el alternador. El motor / alternador se cargó hasta un 100% de carga utilizando estos bancos de carga. También se conectó una variac en el banco de carga, de modo que la carga se controlaba precisamente controlando el voltaje en una de las bobinas del banco de carga. El voltímetro y el amperímetro se usaron para medir el voltaje y la corriente consumida por la carga en el banco de carga. El producto de voltaje y corriente da la carga real en el sistema motor-alternador. La velocidad también se verificó con un tacómetro digital de tipo infrarrojo.

## 2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.4.1. CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL DEL ACEITE DE JATROPHA (JB), KARANJA (KB) Y POLANGA (PB)

Las propiedades del combustible de JB, KB, PB y sus mezclas en comparación con las del diésel se muestran en la tabla. Los procedimientos y técnicas experimentales adoptados para el análisis de las propiedades del combustible también se dan en la tabla. Las propiedades del biodiésel y sus mezclas se comparan con las de los estándares de biodiésel de ASTM. La mayoría de las propiedades de combustible de JB, KB, PB y sus mezclas son comparables a las del diésel. Los resultados obtenidos muestran que el proceso de transesterificación mejoró las propiedades de combustible del aceite con respecto a la densidad ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ), valor calorífico ( $\text{kJ} / \text{kg}$ ), viscosidad (cSt), punto de inflamación ( $^{\circ} \text{C}$ ), punto de enturbiamiento ( $^{\circ} \text{C}$ ) y punto de fluidez ( $^{\circ} \text{C}$ ). La comparación de estas propiedades con el diésel muestra que los ésteres metílicos del aceite de Jatropha, Karanja y Polanga tienen valores de propiedad de combustible relativamente más cercanos a los del diésel (HSD). Por lo tanto, no se requieren modificaciones de hardware para manejar estos combustibles (biodiesel y sus mezclas) en el motor existente.

S.no.	Mezcla de combustible	Densidad ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )	CV ( $\text{kJ} / \text{kg}$ )	Viscosidad a $40^{\circ} \text{C}$ (cSt)	Punto de inflamación ( $^{\circ} \text{C}$ )	Punto de nube ( $^{\circ} \text{C}$ )	Punto de fluidez ( $^{\circ} \text{C}$ )
1	Diesel	850	44000	2,87	76	6,5	3.1
2	JB20	852	43759,5	3,02	88	6,9	3,3
3	JB50	857	43323	3,59	113	7.3	3.4
4 4	JB100	873	42673	4.23	148	10,2	4.2 4.2
5 5	KB20	851	43690	3,04	96	8,9	3.1
6 6	KB50	856	43307	3,62	106	11,2	4.2 4.2
7 7	KB100	883	42133	4.37	163	14,6	5.1
8	PB20	852	43109	2,98	86	7.8	2.9
9	PB50	857	42542	3,42	93	8.7	2.9
10	PB100	869	41397	3.99	140	13,2	4.3
Procedimiento prueba	de	ASTM D4052	ASTM D240	ASTM D445	ASTM D93	ASTM D2500	ASTM D97

Tabla 2.4.1. Propiedades del biodiésel de Jatropha (JB), Karanja (KB), Polanga (PB), Diésel y sus mezclas

Los valores caloríficos de todo el biodiesel y sus mezclas son más bajos que los del diésel debido a su contenido de oxígeno. La presencia de oxígeno en el biodiesel ayuda a la combustión completa del combustible en el motor. El punto de inflamación de todo el biodiesel y sus mezclas se reduce por transesterificación, pero aún es más alto que el del diésel. La adición de una pequeña cantidad de biodiesel con diésel aumenta el punto de inflamación del diésel. Por lo tanto, es más seguro almacenar mezclas de biodiésel-diésel en comparación con el diésel solo. Se observa que las características de combustión típicas de Jatropha (JB), Karanja (KB) y Polanga biodiesel (PB) están en el rango cercano de los requisitos del motor.

## **2.4.2. ANÁLISIS DE COMBUSTIÓN**

Las características significativas relacionadas con los aspectos de la combustión se resumen en las siguientes figuras. La presión máxima alcanzada con el biodiésel diésel, Jatropha, Karanja, Polanga y sus mezclas a plena carga se muestra en la figura 2.4.2.1. La tasa de liberación de calor en los puntos de operación seleccionados de diferentes combustibles mezcla de diésel-biodiésel y la operación de diésel puro también se muestran en la figura 2.4.2.3. La presión máxima, la velocidad de liberación de calor sin carga y la media carga también se analizan, lo que proporciona información muy significativa sobre el retraso de ignición en caso de biodiesel, diésel y sus mezclas.

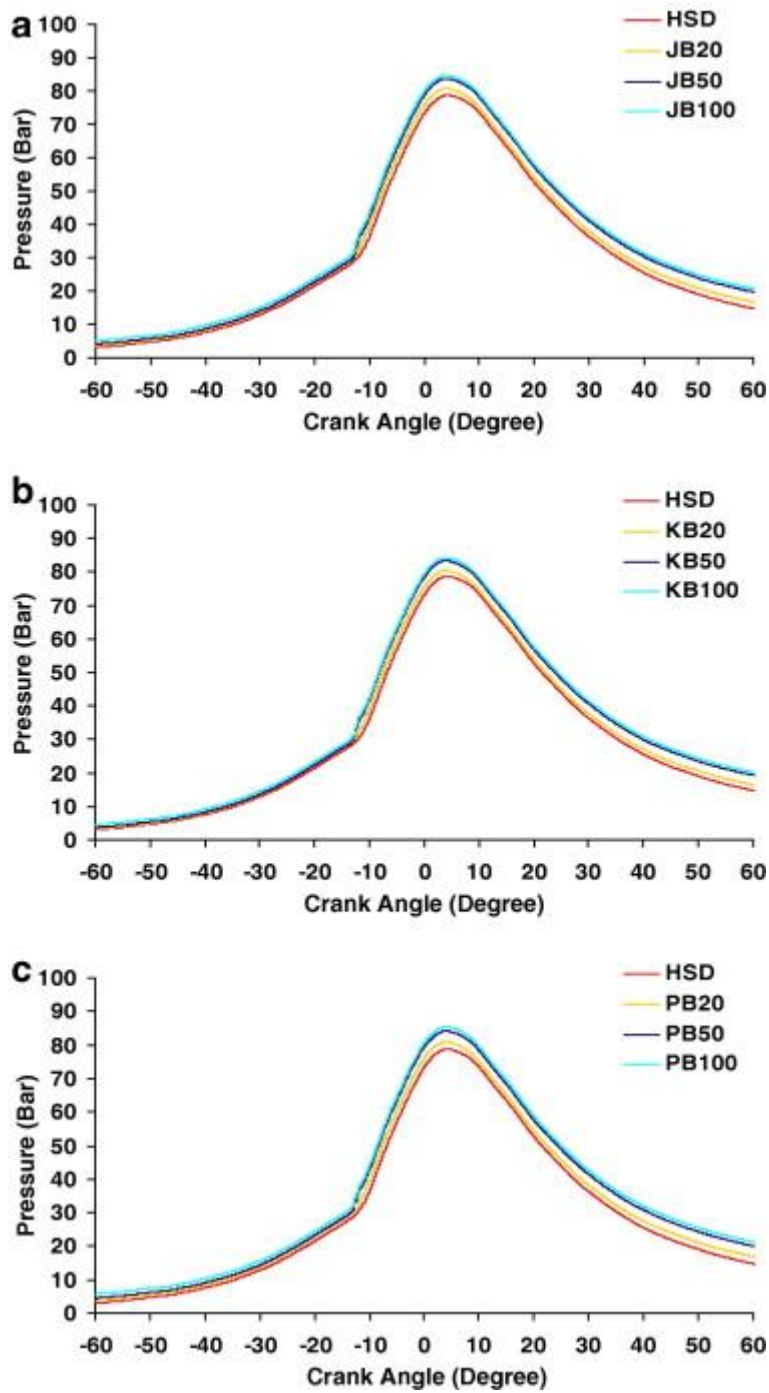


Ilustración 2.4.2.1. (a) Presión vs. ángulo de arranque para diésel, biodiésel Jatropha y mezclas a plena carga. (b) Presión vs. ángulo de arranque para diésel, biodiésel Karanja y mezclas a plena carga. (c) Presión versus ángulo de arranque para diésel, biodiésel Polanga y mezclas a plena carga.

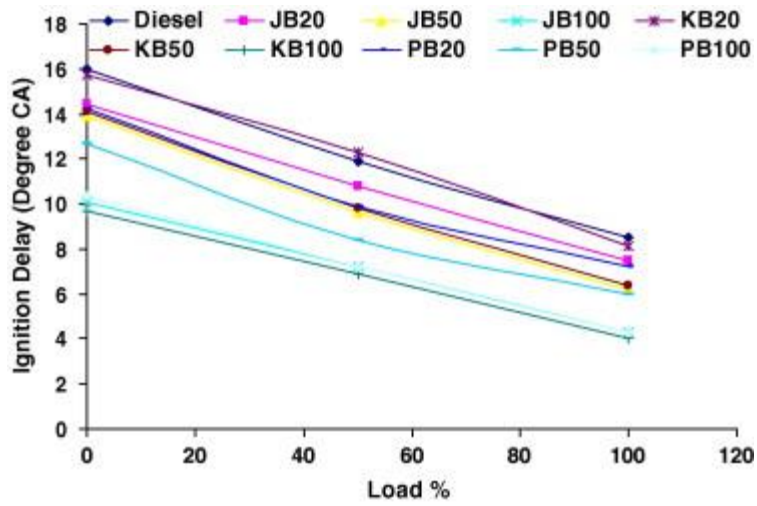


Ilustración 2.4.2.2. Efecto de la carga sobre el retraso de ignición para diésel, biodiésel y sus mezclas

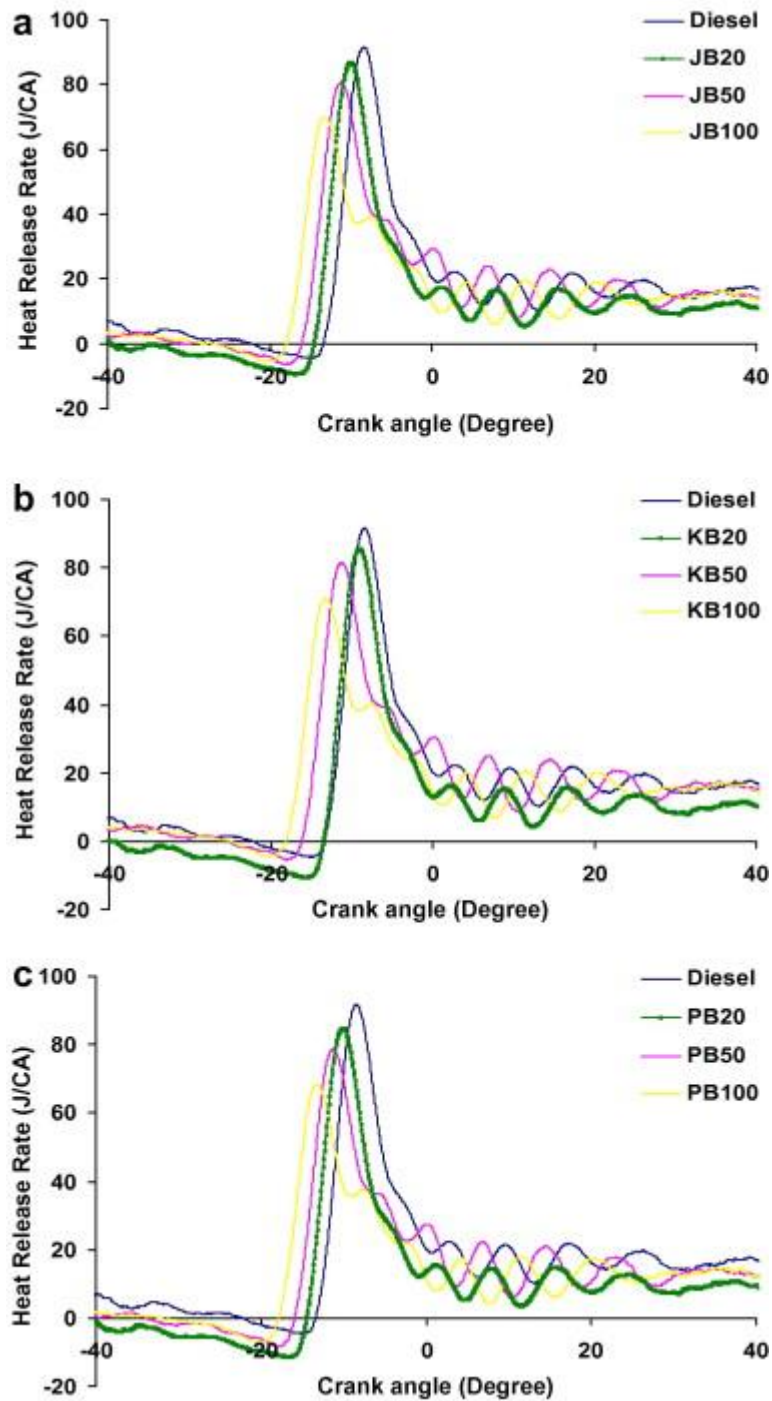


Ilustración 2.4.2.3. (a) Velocidad de liberación de calor para diésel, biodiésel Jatropha y mezclas a plena carga. (b) Velocidad de liberación de calor para diésel, biodiésel Karanja y mezclas a plena carga. (c) Velocidad de liberación de calor para diésel, biodiésel Polanga y mezclas a plena carga.

#### EFFECTO DE LAS MEZCLAS SOBRE LA PRESIÓN DEL CILINDRO

Se puede ver en la figura 2.4.2.2 que el biodiésel de Polanga (PB100) tenía una presión máxima 8.5% mayor que la del diésel puro seguido de JB100 (7.6%) y KB100 (6.9%). La misma tendencia se observa durante todo el rango de operación del motor sin carga y en condiciones de media carga para todos los combustibles de prueba. Está claro de la figura 2.4.2.2 y la tabla 2.4.2 que la presión máxima para JB100, JB50, JB20,

KB100, KB50, KB20, PB100, PB50 y PB20 es de 84.7 bar a 4.8 ° CA después de TDC, 83.71 bar a 5 ° CA después de TDC, 80.7 bares a 5.3 ° CA después de TDC, 84.2 bares a 4.9 ° CA después de TDC, 83.3 bares a 5.2 ° CA después de TDC, 80.4 bares a 5.3 ° CA después de TDC, 85.31 bares a 5 ° CA después de TDC, 84,1 barra que ocurre a 5.1 ° CA después de TDC y 80.9 barra que ocurre a 5.2 ° CA después de TDC, respectivamente, mientras que en el caso la presión máxima es 78.7 bar que ocurre a 5.8 ° CA después de TDC. Por lo tanto, la presión máxima para JB100, JB50, JB20, KB100, KB50, KB20, PB100, PB50 y PB20 es 6 bar, 4.09 bar, 2 bar, 5.5 bar, 4.6 bar, 1.7 bar, 6.6 bar, 5.4 bar y 2.2 bar más alto que el del diésel, respectivamente.

<b>Combustible y parámetros</b>	<b>Inicio de inyección (°) BTDC</b>	<b>Inicio de combustión (°) BTDC</b>	<b>Retardo de encendido (°)</b>	<b>Presión pico (bar)</b>	<b>HRR pico (Joule / CA)</b>
Diesel	23	14,5	8.5	78,7	90,96
JB20	23	15,5	7.5	80,7	86,79
JB50	23	16,8	6.2	83,71	80,52
JB100	23	18,7	4.3	84,7	69,97
KB20	23	14,9	8.1	80,4	85,49
KB50	23	16,6	6.4	83,3	81,52
KB100	23	19	4.4	84,2	70,93
PB20	23	15,8	7.2	80,9	84,8
PB50	23	17	6.6	84,1	78,56
PB100	23	18,7	4.3	85,31	68,37

Tabla 2.4.2. Parámetros de combustión de combustibles de prueba en motores diésel con carga máxima

Las primeras características de pico requieren una atención cuidadosa para garantizar que, mientras se ejecuta con biodiésel y sus mezclas, la presión máxima se produce definitivamente después de TDC para una operación segura y eficiente. De lo contrario, una presión máxima que ocurre muy cerca de TDC o antes de eso causa un fuerte golpe del motor y, por lo tanto, afecta la durabilidad del motor. De esta discusión se



concluye que PB100, que proporciona la presión máxima del cilindro (6.61 bares más alta que la del diésel), es la combinación óptima de combustible en lo que respecta a la presión máxima del cilindro. Sin embargo, es importante estudiar el trabajo instantáneo realizado por el pistón, y puede dar el análisis más preciso para encontrar la combinación óptima de combustible.

### EFECTO DE LAS MEZCLAS SOBRE LA TASA DE LIBERACIÓN DE CALOR

La figura 2.4.2.3 muestra la tasa de liberación de calor que indica que el retraso de ignición para el biodiesel y sus mezclas fue más corto que el del diésel. También se puede ver en la tabla anterior que la tasa máxima de liberación de calor del biodiesel y sus mezclas es menor que la del diésel, específicamente, 69.97 J / deg CA para JB100, 70.93 J / deg CA para KB100 y 68.37 J / deg CA para PB100 en comparación con 90.96 J / deg CA para diésel. Esto se debe a que, como consecuencia de la demora de ignición más corta, la fase de combustión de la premezcla para el biodiesel y sus mezclas es menos intensa. Por otro lado, mientras funcionaba con diésel, el aumento de la acumulación de combustible durante el período de retraso relativamente más largo resultó en una mayor tasa de liberación de calor. Debido a la demora más corta, la tasa máxima de liberación de calor ocurre antes para el biodiesel y sus mezclas en comparación con el diésel puro. Sin embargo, la liberación de calor durante la fase de combustión tardía para el biodiesel y sus mezclas es marginalmente menor que la del diésel. Esto se debe a que los componentes con mayor contenido de oxígeno son adecuados para garantizar la combustión completa del combustible que queda durante la fase de combustión principal y continuar ardiendo en la fase de combustión tardía.

### EFECTO DE LAS MEZCLAS SOBRE EL RETRASO DEL ENCENDIDO

El aumento en la viscosidad del combustible, particularmente para los combustibles derivados del petróleo, da como resultado una atomización deficiente, una mezcla más lenta, una mayor penetración y un ángulo de cono reducido. Estos dan como resultado un retraso de encendido más prolongado. Pero el biodiésel no se deriva del petróleo crudo, y se observa la tendencia opuesta en el caso del biodiésel y sus mezclas. La figura 3 compara los retrasos entre el diésel puro, el biodiésel puro y sus mezclas a diversas cargas. Los retrasos son consistentemente más cortos para JB100, variando entre 5.9 ° y 4.2 ° CA más bajo que el diésel con la diferencia que aumenta la carga. Del mismo modo, los retrasos son más cortos para KB100 (que varía entre 6.3 ° y 4.5 ° CA) y PB100 (que varía entre 5.7 ° y 4.2 ° CA) más bajo que el diésel. El biodiesel generalmente incluye un pequeño porcentaje de diglicéridos que tienen puntos de ebullición más altos que el diésel. Sin embargo, las reacciones químicas durante la inyección de biodiesel a alta temperatura resultaron en la descomposición de los ésteres de alto peso molecular. Estas complejas reacciones químicas condujeron a la formación de gases de bajo peso molecular. La rápida gasificación de este aceite más ligero en la franja

del aerosol se extiende por el chorro, y, por lo tanto, los compuestos de combustión volátiles se encendieron antes y redujeron el período de retraso. Es probable que el biodiesel derivado del aceite de Jatropha, Karanja y Polanga que tiene un peso molecular más alto reaccione de manera idéntica.

## **2.5. CONCLUSIONES**

La combinación apropiada necesaria para garantizar un rendimiento óptimo, bajas emisiones y mejores características de combustión depende de la materia prima particular y la posterior formulación de biodiésel. El presente análisis revela que el biodiesel del aceite de semilla de Jatropha, Karanja y Polanga sin refinar es bastante adecuado como alternativa al diésel. Se concluye que el biodiesel Polanga puro (PB100) que resulta en la presión máxima del cilindro (6.61 bar superiores a la del diésel) es la combinación óptima de combustible en lo que respecta a la presión máxima del cilindro. Los retrasos de ignición son consistentemente más cortos para JB100, variando entre 5.9 ° y 4.2 ° de ángulo del cigüeñal más bajo que el diésel con la diferencia que aumenta con la carga. Del mismo modo, los retrasos de ignición son más cortos para KB100 (que varía entre un ángulo de arranque de 6.3 ° y 4.5 °) y PB100 (que varía entre un ángulo de arranque de 5.7 ° y 4.2 °) más bajo que el diésel. Sin embargo, también es necesaria una mayor investigación y desarrollo sobre las medidas adicionales de propiedad del combustible, el funcionamiento a largo plazo y el análisis del desgaste del motor alimentado con biodiesel junto con el tiempo y la duración de la inyección para una mejor combustión del biodiesel en motores diésel.

# **3 EFECTO DE LOS COMBUSTIBLES BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DIÉSEL**

---

## **3.1. INTRODUCCIÓN**

Es un hecho conocido que los suministros de combustibles fósiles se están agotando mientras que las emisiones de dióxido de carbono están aumentando enormemente. Por otro lado, reemplazar el diésel de

petróleo por aceites vegetales en motores diésel causa algunos problemas resultantes de una menor volatilidad y una mayor viscosidad, densidad y peso molecular. Por lo tanto, el proceso de transesterificación se ha utilizado para producir combustible biodiesel para superar sus problemas operativos.

El biodiesel y los aceites vegetales se producen a partir de cultivos agrícolas renovables que contienen aceite vegetal. El combustible biodiésel *Jatropha* incluye menos carbono que el combustible diésel y, por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> son comparativamente más bajas. El uso de mezclas de biodiésel de *Jatropha* puede reducir el humo, las emisiones no quemadas de HC, CO y CO<sub>2</sub>. Pero las emisiones de NO<sub>x</sub> y HC pueden aumentar ligeramente. La opacidad del humo como resultado de la combustión del biodiesel de *Jatropha* es menor que la del combustible diésel, ya que la cantidad de oxígeno en las mezclas es mayor que mantiene el proceso de combustión completa.

A medida que aumenta la proporción de aceite de biodiesel *Jatropha* en la mezcla, disminuye el porcentaje de emisión de CO. Esto se debe al menor contenido de carbono en las mezclas de biodiesel. Se informa que el biodiesel *Jatropha* es una alternativa adecuada al combustible diésel. Los ésteres metílicos de *Jatropha* y sus mezclas están dentro de los límites aceptables de los estándares.

El objetivo del presente estudio es investigar el efecto de diferentes fuentes de materia prima de biodiesel mezcladas con combustible diésel en las emisiones existentes del motor. Se analiza el efecto de las mezclas de biodiesel B10 y B20 sobre las emisiones de escape de un motor diésel que funciona con diferentes cargas de motor. Las emisiones como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, opacidad de humo y HC están documentadas para comparar entre diferentes tipos de combustibles diésel.

### **3.2. PREPARACIÓN DE BIODIÉSEL**

La transesterificación catalizada con base se usó para preparar biodiesel a partir de aceite de *Jatropha*. Se usó un proceso de dos etapas para la esterificación del aceite de *Jatropha* con FFA superior al 3%, primero por neutralización y luego por transesterificación. El potasio se disolvió en metanol en una relación molar de 6: 1 en un recipiente separado y luego se añadió al aceite de *Jatropha* mientras se agita la mezcla continuamente. La mezcla se mantuvo a presión atmosférica y temperatura 65 ° C durante 60 min. Luego, la mezcla se dejó sedimentar durante 24 h en un embudo de separación.

Mezclas de biodiesel	Densidad a 15.56 ° C, kg / m <sup>3</sup>	Viscosidad cinemática a 40 ° C, mm <sup>2</sup> / s (cst)	Punto de inflamación, ° C	Valor calorífico, kJ / kg	Numero de cetano
	ASTM D-4052	ASTM D-445	ASTM D-93	ASTM D-224	ASTM D-13
Gasóleo	829	2.8	75	42,000	45
Jatropha biodiesel (B20)	845	5.2	88	40,000	53
Jatropha biodiesel (B10)	835	3.5	83	41,500	48

Tabla 3.2. Propiedades físicas y químicas de las mezclas de biodiésel en comparación con el combustible diésel de acuerdo con los estándares ASTM

### 3.3. PLATAFORMA DE PRUEBA EXPERIMENTAL

Un motor diésel de cuatro tiempos y un cilindro de especificaciones técnicas se resumió en la tabla 3.3 que se empleó para las pruebas. En la figura 3.3 se muestra un dibujo esquemático de la configuración experimental que incluye los dispositivos de medición necesarios. Un generador de corriente alterna; La potencia máxima de 4,5 kW se acopló directamente para determinar la potencia del freno del motor donde se utilizó un banco de carga eléctrica controlable externa con cargas variables.

Parámetros del motor	Especificación
Modelo de motor	DEUTZ F1L511
Número de cilindro	1
Aburrir	100 mm
Carrera	105 mm
Desplazamiento	824 cm <sup>3</sup>
Potencia nominal	5.775 / 7.7 kW / hp

Parámetros del motor	Especificación
Velocidad nominal	1500 rpm
Punto de inyección BTDC	24 ° CA
Tipo de inyección	Inyección directa
Tipo de enfriamiento	Aire acondicionado

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del motor diésel

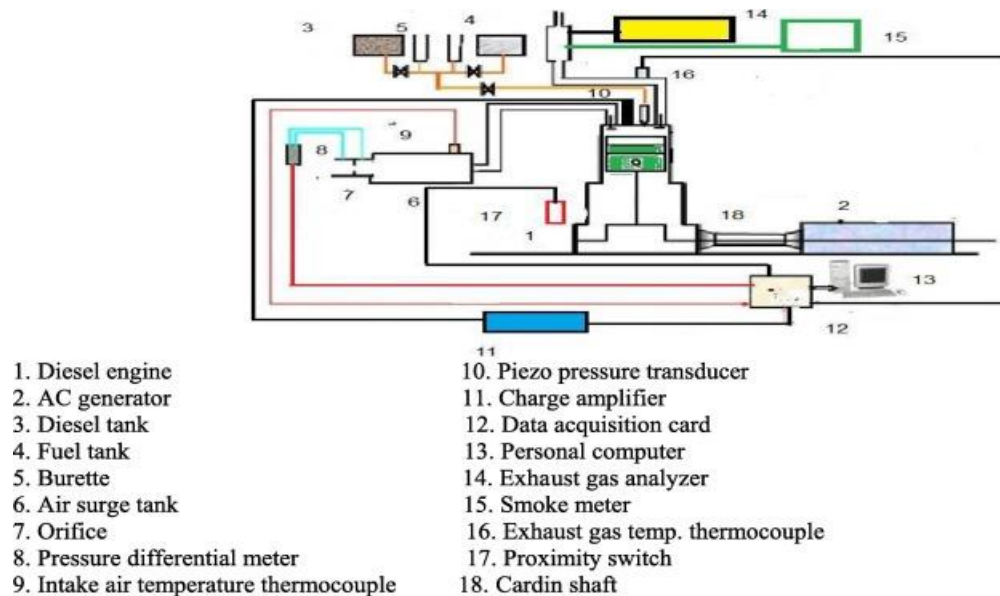


Ilustración 3.3. Diagrama esquemático de un motor de prueba diésel

El presente estudio se llevó a cabo para investigar las emisiones de escape de un motor diésel alimentado con cuatro tipos de biodiésel. El motor había sido equipado para medir el consumo de combustible y la velocidad del motor. El motor recibió aire a través de una caja de aire equipada con un orificio para medir el consumo de aire. El medidor se utilizó para medir la diferencia de presión entre los dos lados del orificio. Se instaló un orificio estándar de bordes afilados en la caja de aire para permitir medir el aire de admisión consumido por el motor. El diámetro del orificio se había calculado en 16 mm. La tasa de consumo de combustible se determinó utilizando una bureta de vidrio y un cronómetro. La velocidad del motor se había medido con un tacómetro digital. La potencia de salida del generador fue consumida por una serie de lámparas eléctricas. El motor se había calentado antes de tomar todas las lecturas. Cuando alcanzó su condición estable, se iniciaron los experimentos y se registraron las mediciones. En primer lugar, el motor funcionaba con combustible diésel. Luego, se ejecutó con mezclas de biodiesel en porcentaje de volumen de

10 y 20% con aceite diésel. Para cada condición operativa, la velocidad del motor se verificó y varió desde la velocidad de ralentí a 1500 rpm, la carga del motor se ajustó a plena carga. Se utilizó un analizador de gases de escape Delta 1600 V, con incorporación de instrumentos MPU, EE. UU., Para medir las concentraciones de emisiones de escape, como las emisiones de CO, HC y NOx del motor durante las pruebas experimentales para mezclas de diésel y biodiésel. Tenía la facilidad de imprimir los resultados de la prueba en una impresora. El medidor de humo OPA-100 se usó para medir el humo Tenía la facilidad de imprimir los resultados de la prueba en una impresora. El medidor de humo OPA-100 se usó para medir el humo Tenía la facilidad de imprimir los resultados de la prueba en una impresora. El medidor de humo OPA-100 se usó para medir la opacidad del humo. Los rangos de medición del análisis de gases de escape fueron (0–10%) para CO, (0–20%) para CO<sub>2</sub>, (0–2000 ppm para CH, (0–4000 ppm) para NO y (0–1000 ppm) para NO<sub>2</sub>.

### 3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.4.1. EFECTO DE LA MEZCLA DE BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE CO

La variación de las emisiones de CO con la carga del motor para aceite diésel, biodiésel, mezclas de biodiésel B10 y B20, así como aceite de palma, algas y cocina residual se ilustraron en la siguiente figura. Para todos los combustibles probados, se observó que la emisión de CO disminuyó con el aumento de la carga del motor a carga parcial y luego volvió a aumentar a plena carga. Esto se debió al aumento del consumo de combustible que condujo a una rica mezcla de aire y combustible. En comparación con el "combustible diésel puro, se observó una reducción significativa en la emisión de CO en todo el rango de carga del motor cuando se utilizó biodiesel y sus mezclas. Esto se debió a un mayor contenido de oxígeno en el biodiesel que el combustible diésel que dio una combustión más completa.

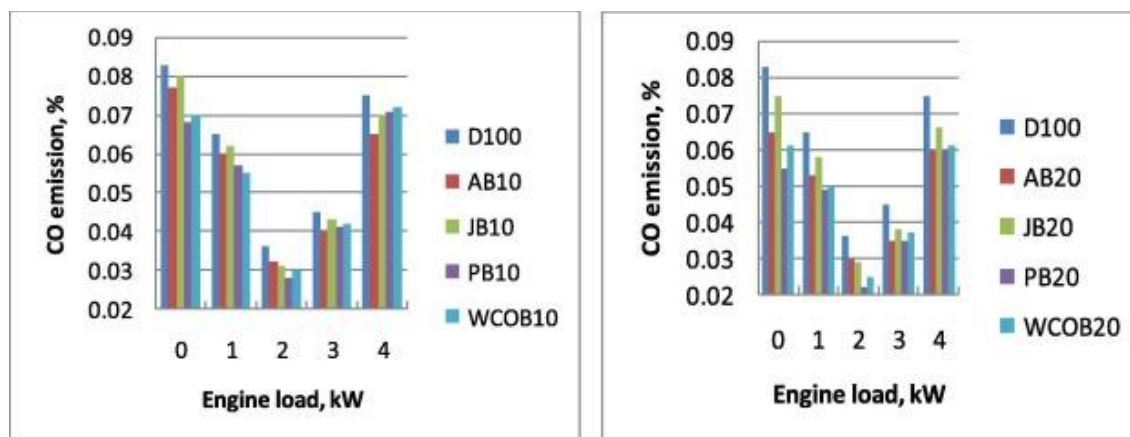


Ilustración 3.4.1. Variación de la emisión de CO con carga del motor para mezclas de biodiésel

### 3.4.2. EFECTO DEL BIODIÉSEL EN LAS AMISIONES DE CO<sub>2</sub>

En la siguiente figura se representaron las emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes cargas del motor en el caso de mezclas de biodiésel de aceite diésel, jatropa, palma, algas, aceite de cocina residual. A medida que aumentaba la carga del motor, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaban debido al mayor consumo de combustible asociado con el aumento de la carga. Se notaron menores emisiones de CO<sub>2</sub> para todas las mezclas de biodiesel examinadas Jatropa, palma y algas en comparación con el diésel. La reducción en la emisión de CO<sub>2</sub> se explicó en términos del mayor contenido de oxígeno en las mezclas de biodiesel Jatropa, algas y palma en comparación con el aceite diésel. El aumento de CO<sub>2</sub> la emisión se debió al mayor contenido de oxígeno en las mezclas de biodiesel de aceite de cocina residual en comparación con el aceite diésel.

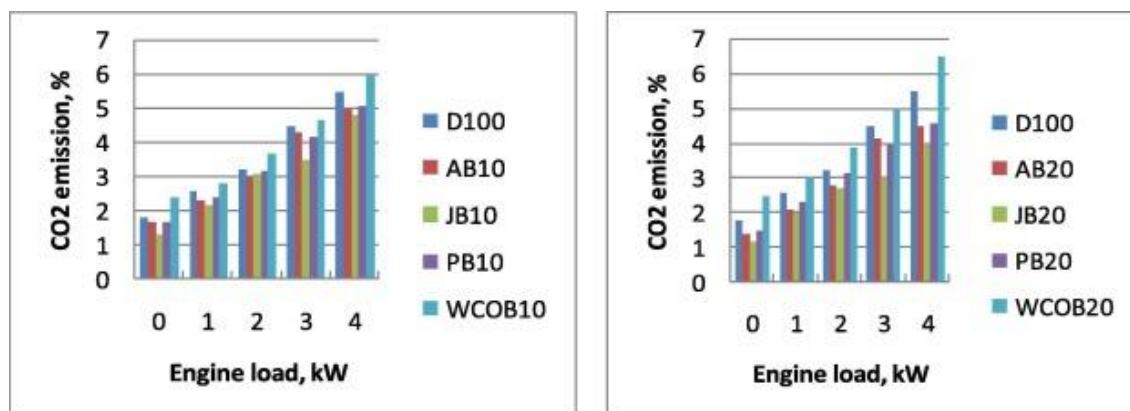


Ilustración 3.4.2. Variación de la emisión de CO<sub>2</sub> con carga del motor para mezclas de biodiésel

### 3.4.3. EFECTO DEL BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE NO<sub>x</sub>

La siguiente figura presenta el efecto de la carga del motor sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> para el combustible diésel, jatropa, algas, palma y biodiesel de aceite de cocina de desecho en comparación con el aceite diésel. Las emisiones de NO<sub>x</sub> para todas las mezclas de biodiesel fueron más altas que las del diésel. El aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub> con el aumento de la carga del motor resultó de una temperatura de combustión del cilindro más alta y una temperatura de llama adiabática más alta. La formación de NO<sub>x</sub> fue favorecida por las temperaturas de combustión del cilindro más altas y la disponibilidad de oxígeno. La combustión del biodiesel produjo más emisiones de NO<sub>x</sub> en comparación con el diésel.

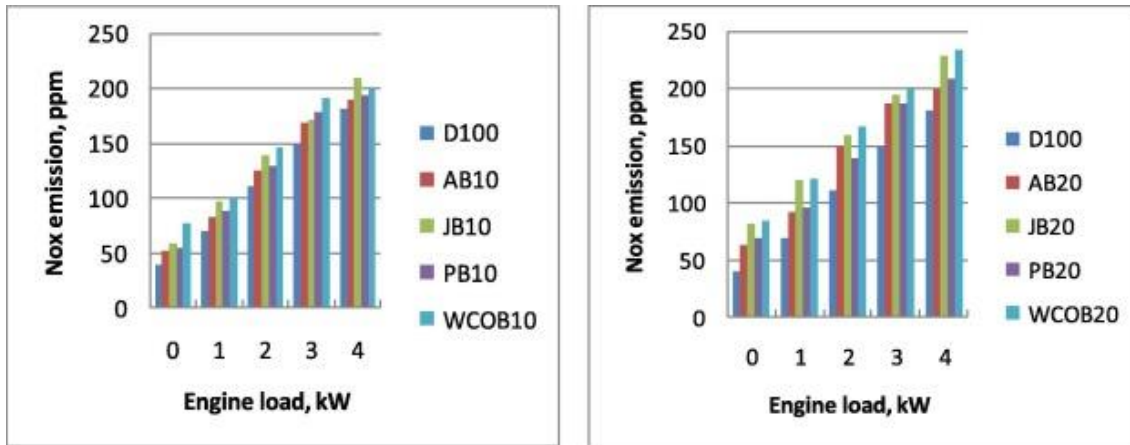


Ilustración 3.4.3. Variación de la emisión de NO<sub>x</sub> con la carga del motor para mezclas de biodiésel

### 3.4.4. EFECTO DEL BIODIÉSEL EN LAS EMISIONES DE HC

La siguiente figura muestra la variación de las emisiones de HC con la carga del motor para las mezclas de biodiésel de aceite de cocina, jatropha, palma, algas y aceite de cocina residual. Las emisiones de HC para todos los combustibles probados fueron menores con una carga parcial del motor, pero aumentaron con una mayor carga del motor. El gran tamaño de las partículas de combustible, el tiempo de inyección y la obstrucción de la boquilla también aumentaron el tiempo de combustión. Esto se debió a la relativamente menor cantidad de oxígeno disponible cuando se inyectó más combustible a cargas más altas. Un retraso de ignición más corto asociado con combustibles con un mayor número de cetano también podría reducir el exceso de combustible mezclado, que era la fuente principal de hidrocarburos no quemados.

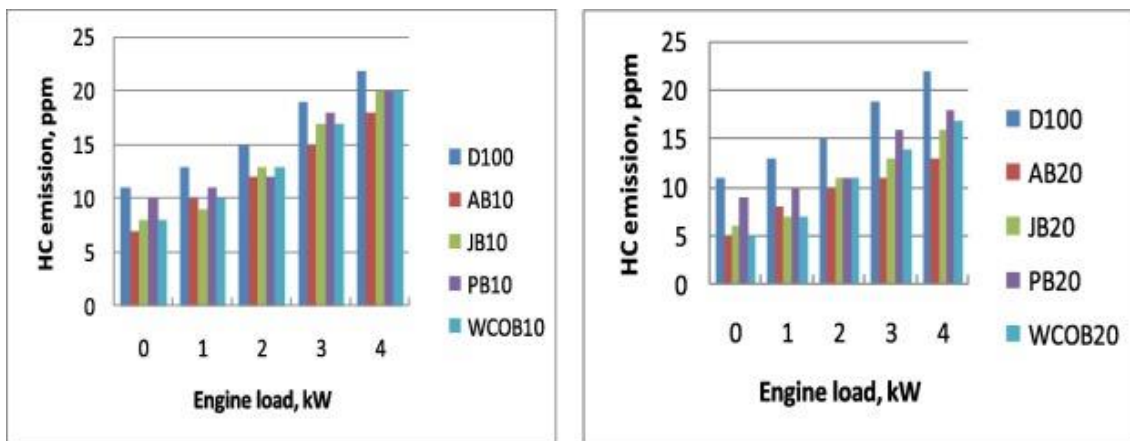


Ilustración 3.4.4. Variación de la emisión de HC con carga del motor para mezclas de biodiésel

### 3.4.5. EFECTO DEL BIODIÉSEL SOBRE LA OPACIDAD DEL HUMO

Las emisiones de opacidad del humo con carga del motor para todas las mezclas de biodiesel se muestran en



la figura. Hubo un aumento de la emisión de humo con un aumento de la carga del motor. Esto se debió al aumento en el consumo de combustible que condujo a una rica mezcla de aire y combustible. La disminución en las emisiones de humo se debió al hecho de que había más moléculas de oxígeno y menor contenido de carbono en el combustible en comparación con el diésel que condujo a una mejor combustión.

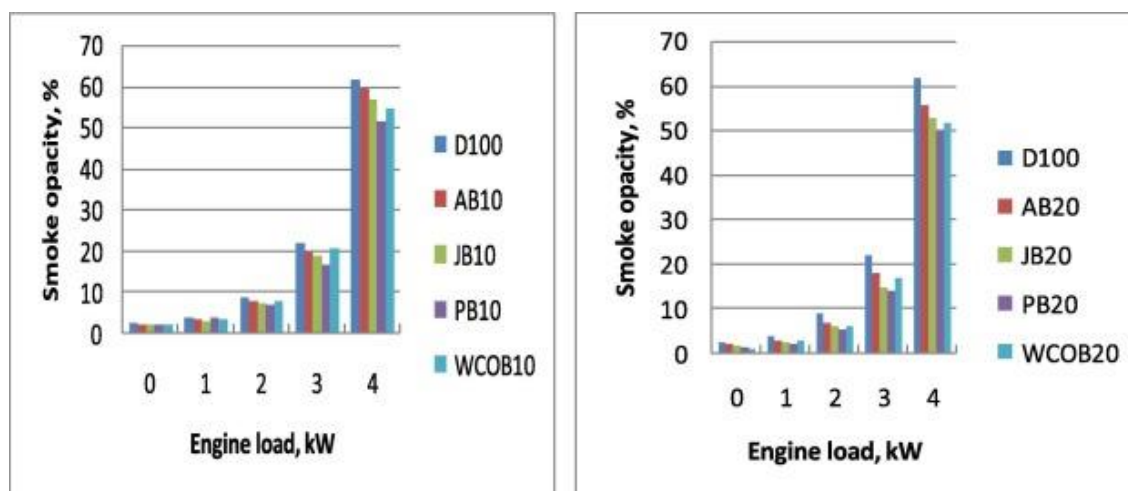


Ilustración 3.4.5. Variación de la emisión de humo con carga del motor para mezclas de biodiésel

### 3.5. CONCLUSIONES

Se ejecutó un motor diésel de un solo cilindro utilizando diferentes fuentes de biodiésel como Jatropha, palma, algas y mezclas de biodiesel de aceite de cocina residual B10 y B20. Las emisiones de escape se examinaron con diferentes cargas de motor de 1, 2, 3 y 4 kW y una velocidad constante del motor de 1500 rpm. Se examinaron las emisiones de escape, como las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC y humo, y se compararon con el combustible diésel. Las siguientes conclusiones podrían resumirse como:

- Las emisiones de CO, HC y humo fueron menores para los cuatro tipos de biodiésel probados (Jatropha, palma y algas y aceite de cocina residual), mezclas B10 y B20 en comparación con el combustible diésel.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> de las mezclas de biodiesel B10 y B20 producidas a partir del aceite residual de cocina fueron mayores en comparación con el combustible diésel y el otro combustible de biodiesel.

- Emisiones de NO<sub>x</sub>; de las mezclas de biodiesel, B10 y B20 aumentaron en comparación con el combustible diésel para las mezclas de biodiesel examinadas.

# 4 EVALUACIÓN DE LA MEZCLA DE BIODIÉSEL, EL RENDIMIENTO DEL MOTOR Y LAS CARACTERÍSTICAS DE EMISIONES DEL ÉSTER METÍLICO DE JATROPHA CURCAS

---

## 4.1. INTRODUCCIÓN

El biodiésel como combustible alternativo es una de las mejores opciones entre otras fuentes debido a su inmenso potencial para reducir las emisiones contaminantes y para ser utilizado en motores de encendido por compresión. El biodiesel es no explosivo, biodegradable, no inflamable, renovable, no tóxico y respetuoso con el medio ambiente. Tiene propiedades similares con el combustible diésel.

## 4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.2.1. MATERIALES

La tabla siguiente muestra las propiedades fisicoquímicas del aceite de *Jatropha* crudo. Se observó que la viscosidad del petróleo crudo es muy alta (52 mm<sup>2</sup>/s) y es 11 veces mayor que la del combustible diésel. Además, se informó que los ácidos grasos libres (% FFA) del petróleo crudo eran altos (15%).

Propiedades	Unidades	Normas	Aceite de <i>jatropha</i>	Aceite de <i>Jatropha</i> <sup>2</sup>
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445	52	47-54.8

Propiedades	Unidades	Normas	Aceite de <i>jatropha</i>	Aceite de <i>Jatropha</i> <sup>a</sup>
Densidad a 15 ° C	kg / m <sup>3</sup>	ASTM D4052	921	-
punto de inflamabilidad	° C	ASTM D93	220	210–240
Punto de fluidez	° C	ASTM D97	4 4	–3
Punto de nube	° C	ASTM D2500	9	2
Valor calorífico	MJ / kg	ASTM D240	38,66	37.830–42.050
Indice de yodo	g yodo / 100 g	-	94	92.0–112.0
FFA	%	-	15	0.18–3.40
Número de cetano	-	ASTM D613	45	38.0–51.0

Tabla 4.2.1. Propiedades del aceite crudo de *jatropha*

#### 4.2.2. LISTA DE EQUIPO

La siguiente tabla muestra un resumen de los equipos utilizados en este estudio.

No.	Propiedad	Equipo	Método de prueba
1	Viscosidad cinemática	SVM 3000 (Anton Paar, Reino Unido)	ASTM D445
2	Punto de inflamabilidad	de Punto de inflamación Pensky-martens - NPM 440 automático (Norma lab, Francia)	ASTM D93
3	Estabilidad a la oxidación	la 873 Rancimat (Metrohm, Suiza)	EN ISO 14112
4	Nube y punto de fluidez	de Probador de nube y punto de fluidez - NTE 450 automático (Laboratorio Norma, Francia)	ASTM D2500 ASTM D97

No.	Propiedad	Equipo	Método de prueba
5	CCR	Probador de residuos Micro-Carbón Conradson - automático NMC 440 (Norma lab, Francia)	ASTM D4530
6	Azufre total	Multi EA 5000 (Analítico Jena, Alemania)	ASTM D5433
7	Densidad	SVM 3000 (Anton Paar, Reino Unido)	ASTM D1298
8	Valor calórico	Calorímetro básico C2000 (IKA, Reino Unido)	ASTM D240

Tabla 4.2.2. Resumen del equipo utilizado para medir las propiedades

### 4.2.3. COMPOSICIÓN DE ÁCIDOS GRASOS

El ácido graso sin doble enlace se conoce como ácidos grasos saturados y el ácido graso que contiene doble enlace se denomina ácidos grasos insaturados. La composición de ácidos grasos del biodiesel *Jatropha* se probó mediante cromatografía de gases (GC). La tabla 4.2.3.1 muestra las condiciones de funcionamiento del GC. Los resultados de la composición de ácidos grasos del biodiesel *Jatropha* en comparación con el biodiesel de palma (PBD) se muestran en la tabla 4.2.3.2 Se descubrió que el éster metílico de *jatropha* contenía (22,6%) ácidos grasos saturados y (77,4%) insaturados, mientras que el biodiesel de palma contenía (44,4%) ácidos grasos saturados y (55,6%) insaturados.

Propiedad	Especificaciones
Gas portador	Helio a 23.8 psi
Velocidad linear	44 cm / s @ 100 ° C
Tasa de flujo	Aire = 450 ml / min.  $H_2 = 40 \text{ ml / min}$  He = 20 ml / min.

Propiedad	Especificaciones
Temperatura del detector	250 ° C
Presión de la cabeza de la columna	23.8 psi
Dimensión de la columna	30 m × 250 mm × 2.5 µm
Inyector	Inyector dividido, relación 50: 1, volumen de inyección 0.3 µL
Rampa de temperatura 1	Mantener a 100 ° C durante 0 minutos
Rampa de temperatura 2	10 ° C / min a 250 ° C, mantener durante 5 minutos

Tabla 4.2.3.1. Condiciones de funcionamiento del GC

Sl. No.	Ácido graso	Peso molecular	Estructura	Nombre sistemático	Fórmula	JBD (% en peso)	PBD (% en peso)
1	Láurico	200	12: 0	Dodecanoico	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	0.1	-
2	Ácido mirístico	228	14: 0	Tetradecanoico	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	0.1	-
3	Palmitico	256	16: 0	Hexadecanoico	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	14,6	40,3
4 4	Palmitoleico	254	16,1	Hexadec-9-enoico	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	0.6	
5 5	Estearico	284	18: 0	Octadecanoico	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	7.6	4.1
6 6	Oleico	282	18: 1	cis-9-octadecenoico	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	44,6	43,4
7 7	Linoleico	280	18: 2	cis-9-cis-12 Octadecadienoico	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	31,9	12,2
8	Linolénico	278	18: 3	cis-9-cis-12	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	0,3	-
9	Araquidico	312	20: 0	Eicosanoico	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	0,3	-

Tabla 4.2.3.2. Composición de ácidos grasos del biodiésel de *Jatropha*

#### 4.2.4. ANÁLISIS DE PROPIEDADES

Las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido se caracterizaron de acuerdo con los estándares ASTM D6751. Las principales propiedades fisicoquímicas del biodiésel de *Jatropha* son comparables con las del combustible diésel y el biodiesel de palma. La tabla muestra las importantes propiedades fisicoquímicas del biodiesel *Jatropha*.

Propiedades	Unidades	Estándares <sup>a</sup>	ASTM D6751	JBD	PBD	Diesel
Viscosidad cinemática a 40 ° C	mm <sup>2</sup> / s	ASTM D445	1.9–6	4.723	4.617	3.619
Densidad a 15 ° C	kg / m <sup>3</sup>	ASTM D1298	860–900	864,8	859,2	832,8
punto de inflamabilidad	° C	ASTM D93	> 130	182,5	172	77
Punto de nube	° C	ASTM D2500	-	3	dieciséis	-20
Punto de fluidez	° C	ASTM D97	-	3	-	-35
Contenido sulfuroso	ppm	ASTM D5433	0.05%	4.59	5.23	-
Valor calorífico	MJ / kg	ASTM D240	-	40,536	39,907	44,66
Índice de yodo	g I / 100 g	EN 14111	120 máx.	99	61	-
Valor de saponificación	-	-	-	202	206	-
Índice de acidez	mg de KOH / g	ASTM D664	0,05	0,05	0.24	-
Estabilidad a la oxidación	h	EN ISO 14112	3	3,02	2.7	110
Número de cetano	-	ASTM D613	47 min	51	59	48
Carbon Conradson	%	ASTM D4530	0 0	0 0	0 0	-
Peso molecular	-	-	292	296	296	170

Tabla 4.2.4. Principales propiedades fisicoquímicas del biodiésel de *Jatropha* en comparación con el biodiésel de palma

#### 4.2.5. ANÁLISIS FT-IR

El biodiesel *Jatropha* se caracterizó por FT-IR, utilizando un analizador FAME de biodiesel Perkin Elmer equipado con el detector MIR TGS en el rango de 4000–650  $\text{cm}^{-1}$  y procesado con el espectro del programa informático. La siguiente figura muestra el espectro infrarrojo de transformada de Fourier (FT-IR) del biodiesel *Jatropha*. La resolución fue de 4  $\text{cm}^{-1}$  y 8 escaneos. Los picos de características del biodiesel *Jatropha* se muestran en la tabla 4.2.5.

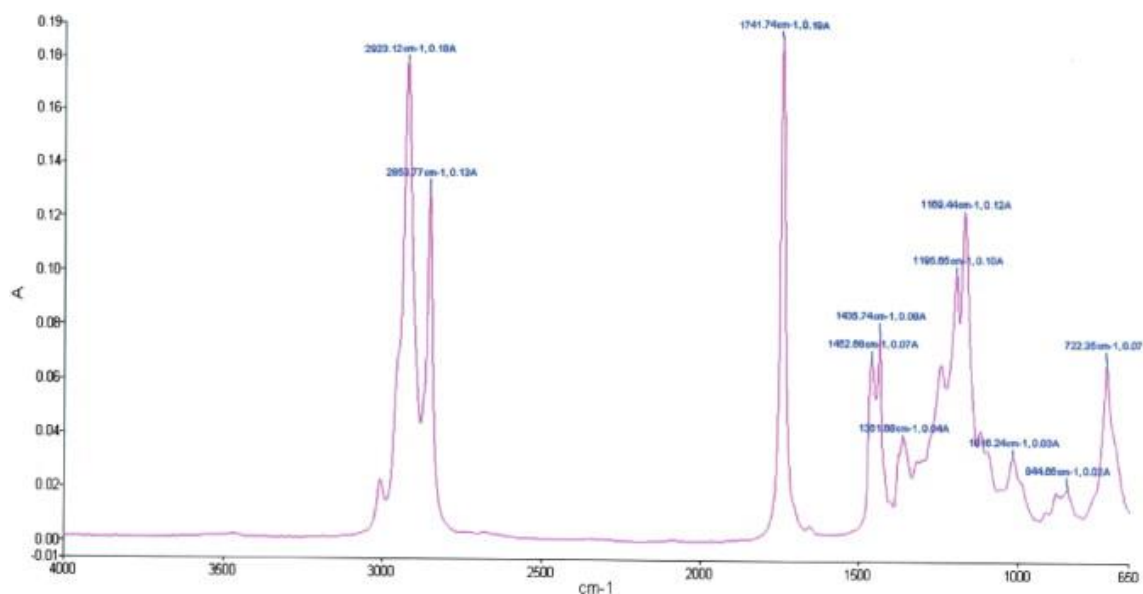


Ilustración 4.2.5. Espectro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) del JBD

Bandas de absorción ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo funcional	Intensidad de absorción
2912	Vibración de estiramiento de C – H	Fuerte
2853	Vibración asimétrica y simétrica de $\text{CH}_2$	Fuerte
1741	C = O vibración de estiramiento	Fuerte
1435–1462	Vibración tipo cizalla $\text{CH}_2$	Regular
1361	Vibración de flexión de $\text{CH}_3$	Regular
1169–1195	Vibración de estiramiento simétrica C – O – C	Regular

Bandas de absorción (cm <sup>-1</sup> )	Grupo funcional	Intensidad de absorción
1016	Vibración de estiramiento antisimétrica C – O – C	Débiles
844	Vibración de anillo epoxi	Regular
722	CH <sub>2</sub> plano vibración oscilante	Débiles

Tabla 4.2.5. Picos de características de JBD en espectros FT-IR

#### 4.2.6. MEZCLA DE BIODIÉSEL

Los combustibles de prueba se mezclan en varias proporciones utilizando un dispositivo homogeneizador a una velocidad de 2000 rpm. El homogeneizador se fijó en una abrazadera en un soporte vertical, lo que permite cambiar la altura del homogeneizador. Para mezclar los combustibles utilizando el homogeneizador, se enciende el tapón y se selecciona la velocidad adecuada mediante el selector que se encuentra en la parte superior del homogeneizador.

#### 4.2.7. PRUEBAS DE MOTOR

La investigación experimental se llevó a cabo utilizando combustible diésel, mezclas de B<sub>10</sub> (90% de diésel y 10% de biodiesel de *Jatropha*) y B<sub>20</sub> (20% de biodiesel de *Jatropha* y 80% de diésel). El motor utilizado es un motor diésel YANMAR TF 120-M fabricado por Yanmar Co. Ltd de Indonesia. La siguiente figura muestra la plataforma de prueba del motor. La especificación detallada del motor se muestra en la tabla 4.2.7.



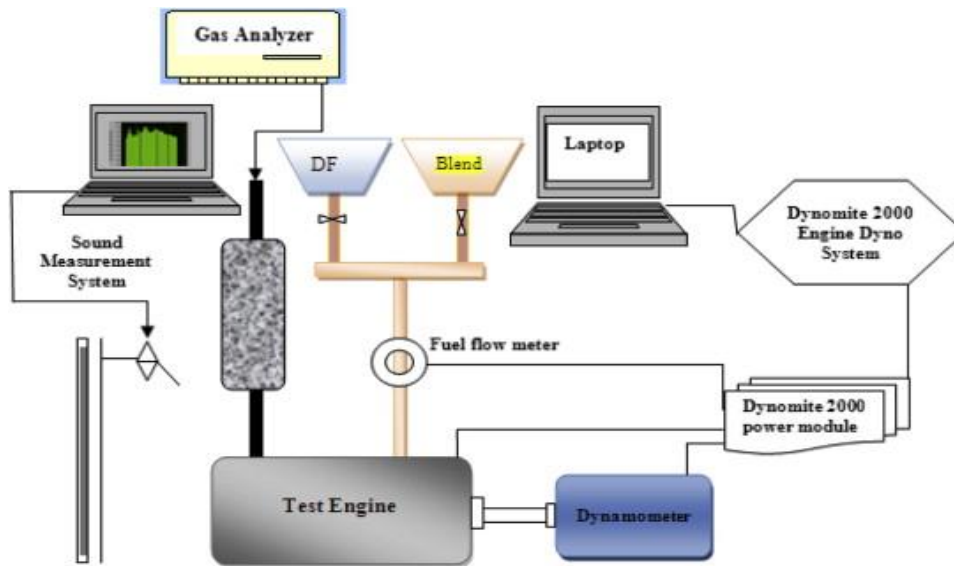


Ilustración 4.2.7. Configuración de prueba del motor

Tipo de motor	Motor diésel de 4 tiempos DI
Número de cilindros	Uno
Aspiración	Aspiración natural
Diámetro del cilindro × carrera (mm)	92 × 96
Desplazamiento (L)	0.638
Índice de compresión	17,7
Velocidad máxima del motor (rpm)	2400
Potencia máxima (kW)	7.7
Tiempo de inyección (grados)	bTDC 17.0
Presión de inyección (kg / cm <sup>2</sup> )	200
Posición de toma de fuerza	Lado del volante
Sistema de refrigeración	Radiador de enfriamiento

Tabla 4.2.7.1. Detalles de la especificación del motor

Antes de hacer funcionar el motor con los combustibles mezclados con biodiésel, el motor funcionó primero con combustible diésel durante unos minutos para calentar el motor. También funcionaba con combustible diésel antes de apagar el motor. Se mantuvo el mismo procedimiento para cada combustible. Para llevar a cabo las pruebas de rendimiento del motor, el motor se ejecutó primero al 100% de carga, manteniendo el acelerador 100% abierto. Las velocidades del motor variaron entre 1200 y 2400 rpm, a un intervalo de 200 rpm. Las condiciones de prueba del motor fueron monitoreadas por el software Dynamax-2000 a través de una computadora portátil conectada al banco de pruebas del motor (figura 2). Se usó un analizador de gases de escape BOSCH BEA-350 para medir los gases de emisión de escape NO<sub>x</sub> / NO, HC y CO. Los análisis de emisiones se han realizado solo a la velocidad máxima del motor (2400 rpm). Los detalles del analizador de gases se muestran en la siguiente tabla. Para obtener los valores promedio, todas las pruebas se repitieron tres veces.

Equipo	Método	Medición	Límite superior	Exactitud	Porcentaje de incertidumbres
Analizador de gas BOSCH	Infrarrojo no dispersivo	CO	10.00 vol. %	± 0.02% vol.	± 0.2
	Infrarrojo no dispersivo	CO <sub>2</sub>	18.00% vol.	± 0.03% vol.	± 0,16
	Detector de ionización de llama (FID)	HC	9999 ppm	± 1 ppm	± 0.5
	Detector de quimioluminiscencia de tipo vacío calentado (CLD)	NO <sub>x</sub> / NO	5000 ppm	± 1 ppm	± 0.5

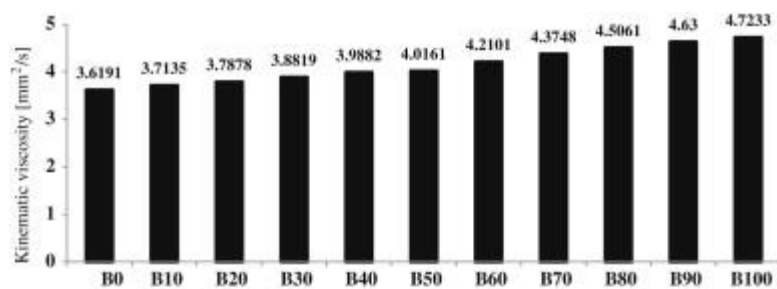
Tabla 4.2.7.2. Detalles del analizador de gases de escape

### 4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

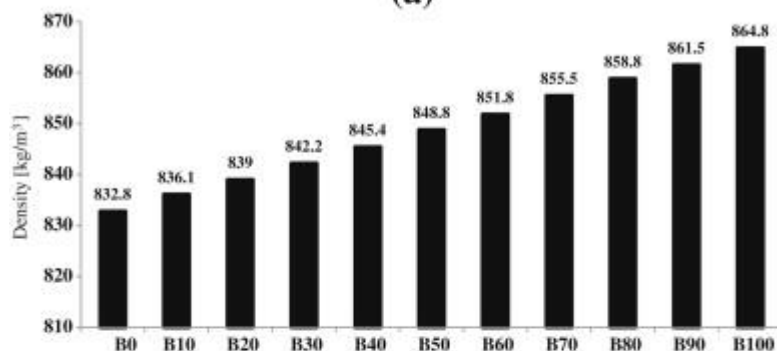
#### 4.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS DE BIODIÉSEL-DIÉSEL DE JATROPHA

Como se mencionó anteriormente en este documento, el biodiésel se puede mezclar con combustible diésel en diferentes proporciones. En este estudio, se prepararon mezclas de biodiésel y diésel (B<sub>10</sub>–B<sub>90</sub>) y se examinó y presentó su influencia en las propiedades del combustible (densidad, punto de inflamación, viscosidad, valor calorífico, nube y punto de fluidez y estabilidad a la oxidación) en la figura 3 se puede ver que las viscosidades cinemáticas de todas las mezclas cumplen con las especificaciones ASTM D6751. La viscosidad cinemática (KV) aumenta a medida que aumentan los porcentajes de biodiésel en las mezclas

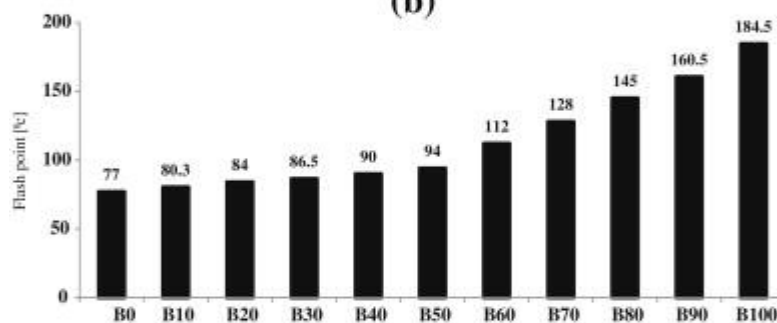
(figura a). Además, las viscosidades de  $B_{10}$  y  $B_{20}$  están casi más cerca del combustible diésel ( $3.7135 \text{ mm}^2 / \text{s}$  y  $3.7878 \text{ mm}^2 / \text{s}$ ). Por lo tanto, se puede notar que  $B_{10}$  y  $B_{20}$  se pueden usar en el motor diésel sin ninguna modificación.



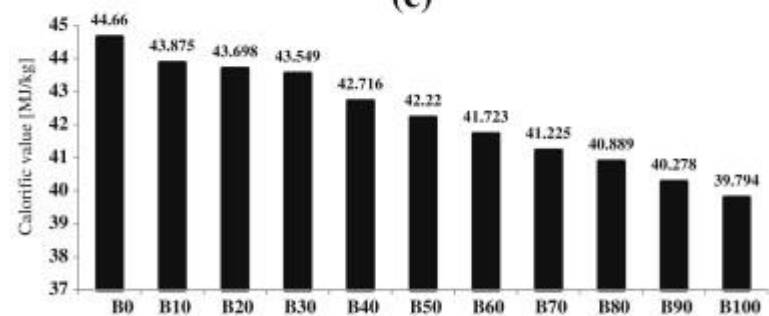
(a)



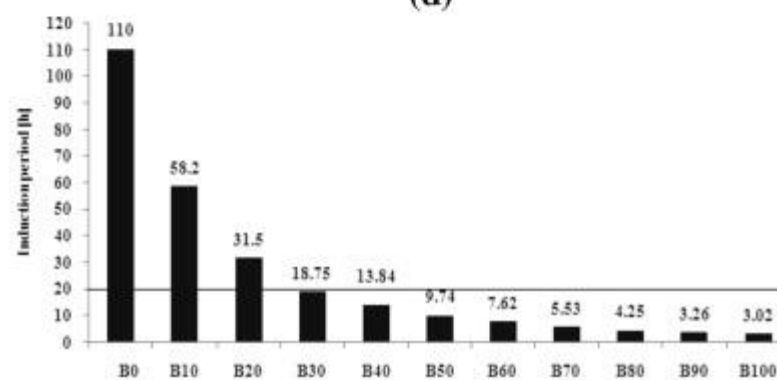
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3.1. Efecto de mezcla sobre (a) viscosidad cinemática (b) densidad (c) punto de inflamación (d) valor calorífico (e) estabilidad a la oxidación

La densidad aumentó a medida que el porcentaje de biodiesel *Jatropha* aumentó en las mezclas (figura b). Las densidades de B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> están muy cerca de la densidad del combustible diésel (836.1 kg / m<sup>3</sup> y 839 kg / m<sup>3</sup>).

El punto de inflamación aumenta a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel *Jatropha* en las mezclas (figura c). En general, el combustible con un punto de inflamación superior a 66 ° C se considera un combustible seguro. Por lo tanto, los resultados de todas las mezclas de biodiesel se consideran seguros para almacenar y usar en el motor.

El valor calorífico disminuye a medida que aumenta la cantidad de biodiesel *Jatropha* en las mezclas (figura d). Esto se debe principalmente al mayor contenido de oxígeno del biodiesel que el del diésel (10% más alto). Así, los contenidos de hidrógeno y carbono en la mezcla disminuyen, que es la fuente de energía térmica.

La estabilidad a la oxidación del biodiesel se cuantifica por período de inducción (IP). Se puede ver en (figura e) que (IP) disminuye a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel en la mezcla. Esto se debe al aumento en el porcentaje de ácidos grasos insaturados en el biodiesel *Jatropha*. Se observó que solo B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> cumplen con la norma europea EN 590 (20 h). El período de inducción para B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> es de 58 h y 31.50 h respectivamente. Los períodos de inducción de las mezclas restantes (B<sub>30</sub>–B<sub>90</sub>) no cumplen con la especificación estándar EN590 y todos son inferiores a 20 h.

### 4.3.2. RENDIMIENTO DEL MOTOR

En este estudio, el rendimiento del motor se evaluó en términos de par, potencia de frenado (BP) y consumo de combustible específico de frenado (BSFC). La siguiente sección discutirá los resultados obtenidos de estos parámetros.

#### ESFUERZO DE TORCIÓN DEL MOTOR

La siguiente figura muestra el par motor de todas las muestras de combustible con respecto a la velocidad del motor. Se puede ver que el par aumenta de manera constante con la velocidad hasta un valor máximo, y luego cae con mayores aumentos de velocidad. Esto se atribuye principalmente a dos razones principales. La primera razón es la pérdida de fricción mecánica, y la segunda es la menor eficiencia volumétrica del motor debido al aumento de la velocidad. Se puede ver que el par motor del combustible B<sub>0</sub> siempre es mayor que el de los combustibles B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub>. El par máximo se registró a 1800 rpm y fue de 21.1 Nm, 20.45 Nm y 20.12 Nm para B<sub>0</sub>, B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> respectivamente. La reducción de torque promedio para B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> en

comparación con B<sub>0</sub> fue 3.08% y 4.6%, respectivamente. La razón de reducir el torque con los combustibles mezclados se debe a la mayor viscosidad y al menor poder calorífico del combustible biodiesel.

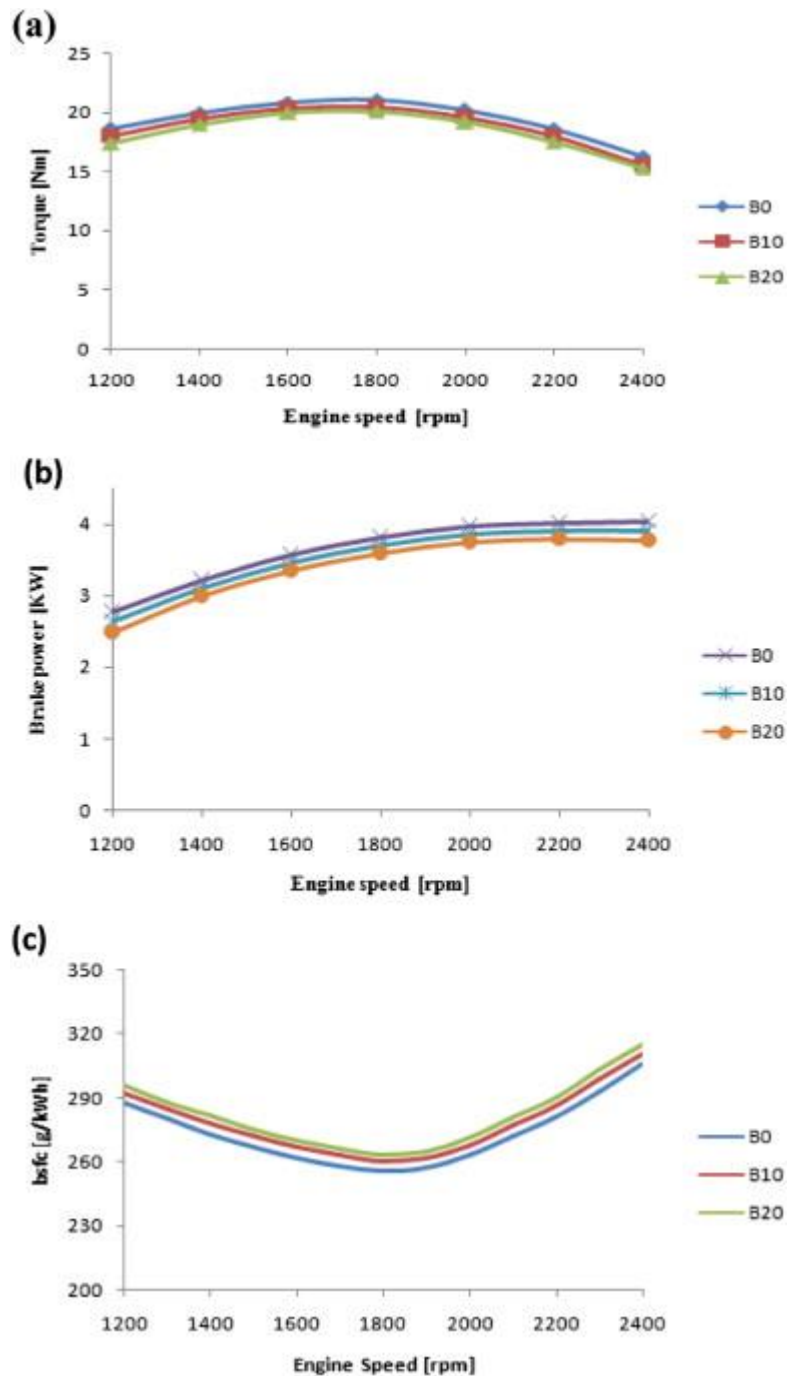


Figura 4.3.2. (a) Características de la velocidad de par (b) características de la velocidad de potencia del freno (c) variación de BSFC con respecto a la velocidad.

La figura 4.b muestra la potencia de salida del freno del motor a diferentes velocidades del motor. Se puede ver que la potencia de frenado aumentó constantemente con la velocidad del motor. La potencia máxima de frenado del motor se registró a 2400 rpm, y fue de 4.06 kW, 3.87 kW y 3.70 kW para B<sub>0</sub>, B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub>, respectivamente. La razón de la menor potencia de frenado de los biodiésel en comparación con el diésel se puede atribuir a sus bajos valores caloríficos y mayores viscosidades. Tanto el valor calorífico como la viscosidad tienen un efecto en la combustión. Además, las características desiguales de combustión del biodiesel disminuyeron la potencia del freno del motor. Además, se ve que la reducción promedio de la potencia de frenado para B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> en comparación con B<sub>0</sub> el combustible es 4.67% y 8.86%, respectivamente.

### **4.3.3. FRENO CONSUMO DE COMBUSTIBLE ESPECÍFICO**

BSFC es la relación entre el flujo másico del combustible probado y la potencia efectiva. El BSFC del motor diésel depende de la relación entre el sistema de inyección volumétrica de combustible, la densidad del combustible, la viscosidad y el menor valor de calentamiento. La figura 4.c muestra la variación del consumo de combustible específico del freno (BSFC) para todas las muestras con respecto a la velocidad del motor. Se ve que el BSFC para los combustibles mezclados con biodiesel es más alto en comparación con el diésel. El BSFC promedio para B<sub>0</sub>, B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> es 273.5 g / kWh, 278.46 g / kWh y 281.9 g / kWh, respectivamente. La razón del mayor BSFC de los biodiésel se puede atribuir a los efectos combinados de la densidad relativa del combustible, la viscosidad y el valor de calentamiento de las mezclas. El combustible biodiesel se entrega al motor de forma volumétrica por carrera; así, grandes cantidades de biodiesel son alimentadas al motor. Por lo tanto, para producir la misma potencia, se necesita más combustible biodiesel porque el biodiesel tiene un valor calorífico más bajo en comparación con el combustible diésel.

### **4.3.4. ANÁLISIS DE LAS EMISIONES**

El análisis de emisiones se realizó solo a la velocidad máxima del motor (2400 rpm). La variación de las emisiones de NO<sub>x</sub>, HC y CO para B<sub>0</sub>, B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> se muestran en la figura.

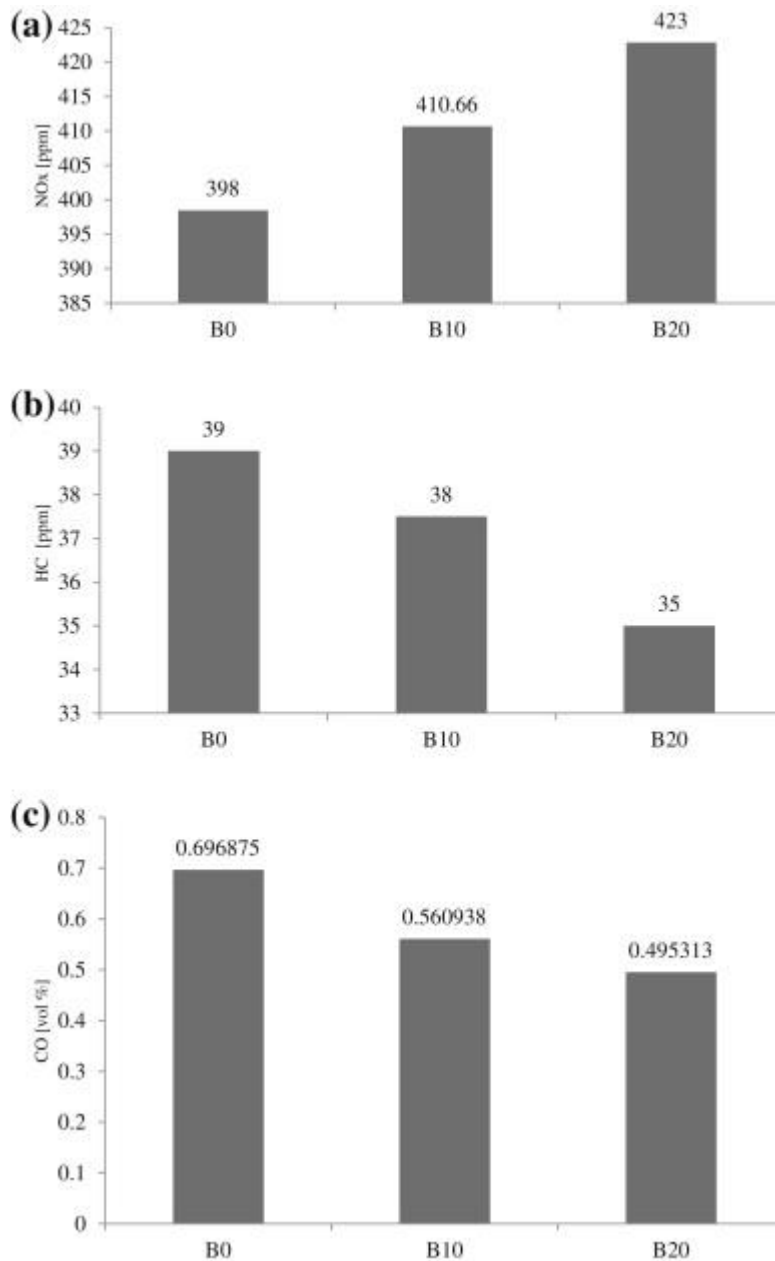


Figura 4.3.4. (a) Emisión promedio de NO<sub>x</sub> para todas las muestras de combustible a la velocidad máxima del motor, (b) emisión promedio de HC para todas las muestras de combustible a la velocidad máxima del motor (c) emisión promedio de CO para todas las muestras de combustible a la velocidad máxima del motor.

De la figura a, se puede ver que la emisión promedio de NO<sub>x</sub> para todas las muestras de combustible B<sub>20</sub>, B<sub>10</sub> y B<sub>0</sub> son 422 ppm, 411 ppm y 398 ppm respectivamente. Se ha observado que B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> producen emisiones de NO<sub>x</sub> 3% y 6% más altas que las del combustible diésel. Esto se puede atribuir a la relación aire/combustible pobre, ya que el biodiésel contiene un 12% más de oxígeno en su estructura molecular. Muchos investigadores informaron que las mezclas de combustible oxigenado pueden causar un aumento en la emisión de NO<sub>x</sub>. Normalmente, la combustión completa provoca una temperatura de combustión más alta, lo que resulta en una mayor formación de NO<sub>x</sub>. Además, la mayor viscosidad de la



mezcla de combustible conduce a un tamaño gota más grande y retraso de ignición más corto. Por lo tanto, la emisión de  $\text{NO}_x$  aumenta.

Por otro lado, la emisión de  $\text{NO}_x$  está fuertemente relacionada con la temperatura máxima de combustión máxima. Un combustible con una mayor tasa de liberación de calor en la fase de combustión de la premezcla y menor tasa de liberación de calor en la fase de combustión tarde aumentará  $\text{NO}_x$  emisión.

El HC no quemado resulta de la combustión incompleta del combustible y la extinción de la llama. La figura 5.b muestra los resultados de las emisiones de HC sin quemar a la velocidad máxima. Se puede ver que el HC no quemado para  $B_{10}$  y  $B_{20}$  es más bajo que el del combustible diésel. Esto se debe al mayor contenido de oxígeno del biodiesel, que ayuda a completar la combustión y, por lo tanto, a reducir las emisiones de HC. Las reducciones promedio en las emisiones de HC para  $B_{10}$  y  $B_{20}$  en comparación con  $B_0$  son 3.84% y 10.25% respectivamente. También se puede ver que las emisiones de HC se reducen a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel en las mezclas.

El CO se forma durante el proceso de combustión con regiones ricas en mezclas de aire y combustible y cuando no hay suficiente oxígeno para quemar completamente todo el carbono del combustible a  $\text{CO}_2$ . La figura c muestra los resultados de la emisión de CO a la velocidad máxima. La reducción promedio de las emisiones de CO para los combustibles  $B_{10}$  y  $B_{20}$  en comparación con  $B_0$  es 16% y 25% respectivamente. Se puede ver que la emisión de CO disminuye al aumentar los porcentajes de biodiesel en las mezclas. Esto se debe a que el biodiesel contiene más oxígeno que el combustible diésel, lo que ayuda a completar la combustión.

## 4.4. CONCLUSIONES

En base a la investigación experimental, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Las viscosidades de  $B_{10}$  y  $B_{20}$  ( $3.7135 \text{ mm}^2/\text{s}$  y  $3.7878 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) están casi más cerca del combustible diésel. Además, la estabilidad a la oxidación de  $B_{10}$  y  $B_{20}$  (58 h y 31.50 h) solo cumple con las especificaciones de la norma europea EN 590 de (20 h).
- Los resultados del punto de inflamación de todas las mezclas se consideran seguros para almacenar y utilizar en motores diésel.
- El valor calorífico disminuyó a medida que la cantidad de biodiesel *Jatropha* aumentó en las mezclas.

- La densidad aumentó a medida que el porcentaje de biodiesel *Jatropha* aumentó en las mezclas.
- Se observó una reducción promedio en la potencia de frenado para B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> en 4.67% y 8.86% respectivamente en comparación con B<sub>0</sub>.
- El par máximo se registró a 1800 rpm y fue de 21.1 Nm, 20.45 Nm y 20.12 Nm para B<sub>0</sub>, B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> respectivamente.
- Se encontró que el BSFC promedio para B<sub>10</sub>, B<sub>20</sub> (278.46 g / kWh y 281.9 g / kWh) era más alto en comparación con B<sub>0</sub> (273.5 g / kWh).
- El uso de B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub> como sustituto parcial del combustible diésel produjo emisiones más bajas de HC (3.84% y 10.25%) y CO (16% y 25%) pero emisiones de NO<sub>x</sub> (3% y 6%) ligeramente más altas en comparación con B<sub>0</sub>.

Estos resultados muestran que las mezclas de biodiesel y diésel *Jatropha* (B<sub>10</sub> y B<sub>20</sub>) se pueden usar en motores diésel sin mayores modificaciones.



# REFERENCIAS

---

- [1] Slinn, M., Kendall, K., Mallon, C., Andrews, J. 2008 “Steam reforming of biodiesel by-product to make renewable hydrogen” *Bioresource Technology*, 99, 5851-5858.
- [2] Abhilash P, Srivastava P, Jamil S, y Singh N (2011). Revisited *Jatropha Curcas* as an oil plant of multiple benefits: critical research needs and prospects for the future. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, (1):127-131.
- [3] Achten W, Verchot L, Franken Y, Mathijs E, Singh V, Aerts R y Muys B (2008). *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass and bioenergy*, 32, (12):1063-1084.
- [4] Akbar E, Yaakob Z, Kamarundin S, Ismail M y Salimon J (2009). Characteristic and composition of *Jatropha curcas* oil Seed from Malaysia and its potential as biodiesel feedstock. *European Journal of Scientific Research*, 2:75-89.
- [5] Aminul A, Yaakob Z, Anuar N, Primandari S y Osman M (2011). Physiochemical Properties of *Jatropha Curcas* Seed Oil from Different Origins and Candidate plus Plants (CPPs). *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89, (2):293-300.
- [6] Atabani A, Silitonga A, Ong H, Mahlia T, Masjuki H, Badruddin I y Fayaz H (2013). Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18:211-245.
- [7] Babcock R, Clausen E, Popp M y Schulte W (2007). Yield characteristics of Biodiesel produced from chicken Fat-Tall oil blended feedstocks. *Completion Report Project Number MBTC- 2092* (Vols. Report MBTC-2092).
- [8] Bailey (2005). Processing technologies. *Industrial oil and fat products* (volumen V:57-182, VI:235- 237). New Jersey: John Wiley and sons.
- [9] Balat M (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy Conversion and Management*, 52:1479-1492.
- [10] Baroi C, Yanful E, Rahman M y Bergougrou M (2009). *Environment Friendly Biodiésel from Jatropha Curcas*. *Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing World*, volumen II:75-89.
- [11] Beerens P (2007). Screw-pressing of *Jatropha* seeds for fuelling purposes in less developed countries. *Thesis of master sustainable energy technology*. Eindhoven University of Technology.
- [12] Benjumea, Agudelo y Ríos (2009). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización*. Bogotá: Banco de la república.

- [13] Bloomberg New Energy Finance (2013). Disponible en <http://about.bnef.com> (último acceso: 01 de abril de 2013)
- [14] Bloomberg New Energy Finance (2013). *New investment in Clean Energy fell 11% in 2012*. Londres.
- [15] Brittain R y Lualaba N (2010). *Jatropha: A Smallholder Bioenergy Crop – The potential for Pro- Poor development*, 8:27-53. Documento corporativo de FAO, disponible en: <http://www.fao.org/docrep/012/i1219e/i1219e00.htm>
- [16] Brossard C, Ferrari R, Pighinelli A y Park K (2010). Evaluación preliminar del etanol anhidro como solvente en la extracción de semillas de Jatropha (*Jatropha curcas*). *Grasas y Aceites*, 61, (3):295-302.
- [17] Cardona C, Gutiérrez L y Orrego C (2009). *Biodiésel*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- [18] ChemHoo. (2012). *Valued Information Innovative Reports*. Disponible en: <http://en.chemhoo.com/index.aspx>.
- [19] CONPES. (2008). CONPES 3510 Lineamientos de política para promover el desarrollo sostenible. Producción de Biocombustibles en Colombia. Bogotá. Concejo Nacional para la política económica y social. Disponible en: [http://www.minminas.gov.co/minminas/hidrocarburos.jsp?cargaHome=3&id\\_subcategoria=228&id\\_categoria=149](http://www.minminas.gov.co/minminas/hidrocarburos.jsp?cargaHome=3&id_subcategoria=228&id_categoria=149), (Último acceso: 19 de November de 2012)
- [20] Convenio Interinstitucional de Cooperación (2003). *Programa estratégico para la producción de biodiesel - combustible automotriz - a partir de aceites vegetales*. Bogotá.
- [21] Devappa R, Maes J, Singh H, Greyt W y Becker K (2010). Quality of Biodiesel Prepared from Phorbol Ester Extracted *Jatropha curcas* Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87:697-704.
- [22] Drapcho, Nhuan y Walter (2008). *Biofuels Engineering Process Technology*. McGraw-Hill. Duff
- [23] EIA (2013). *Energy Information Administration*. Disponible en <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/renewable>.
- [24] Elbehri A, Segerstedt A y Liu P (2013). Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks, 8:27-53. Documento corporativo de FAO, disponible en: <http://www.fao.org/docrep/012/i1219e/i1219e00.htm>.
- [25] FAPRI (2011). *Food and Agricultural Policy Research Institute*. World Agricultural Outlook Database, Disponible en: <http://www.fapri.iastate.edu/tools/outlook.aspx>
- [26] Fargione J, Plevin R y Hill J (2010). The ecological impact of biofuels. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 41:351-377.
- [27] Fedebiocombustibles (2013). Federación Colombiana de Biocombustibles. *Cifras normativas del sector de biocombustibles: Biodiésel de palma de aceite*.

- [28] Fengxian Q, Li Y, Yang D, Li X y Sun P (2011). Biodiesel production from mixed soybean oil and rapeseed oil. *Applied Energy*, 88, (6): 2050-2055.
- [29] Findlater K y Kandlikar M (2011). Land use and second-generation biofuel feedstocks: The unconsidered impacts of *Jatropha* biodiesel in Rajasthan, India. *Energy Policy*, 36, (6):3404-3413.
- [30] Gerpen J, Pruszko R, Knothe G, Shanks B y Clements D (2006). *Building a Successful Biodiesel Business*. Estados Unidos: Biodiesel Basics. *American Oil Chemists Society Biodiesel Handbook*.
- [31] Gobernación del Huila (2008). Convenio interadministrativo de cooperación técnica 143. *Agenda interna del huila para la productividad y competitividad*, disponible en: [www.huila.gov.co](http://www.huila.gov.co).
- [32] Gui M, Lee K, Bathia S (2008). Feasibility of edible oil vs. non-edible oils as biodiesel feedstock. *Energy*, 33:1646-1653.
- [33] Herak D, Gurdil G, Sedlacek A, Dajbych O y Simanjun S (2010). Energy demands for pressing *Jatropha Curcas* L. seeds. *Biosystems engineering*, 106, (4):527-534.
- [34] Huerga I (2010). Producción de biodiesel a partir de cultivos alternativos: Experiencia con *Jatropha curcas*. Argentina: Universidad Nacional de Litoral.
- [35] Inducam (2012). *Manual de operación extractora Inducam LBC1*. Bogotá.
- [36] Jain S y Sharma M (2012). Application of thermogravimetric analysis for thermal stability of *Jatropha curcas*. *Fuels*, 252-257.
- [37] Jingura R.M (2011). Technical options for optimization of production of *Jatropha* as a biofuel feedstock in arid and semi-arid areas of Zimbabwe. *Biomass and Bioenergy*, 35, (5):2127- 2132.
- [38] Kamarudin K, Sazali S, Ali M, Alimin A y Khir S (2009). Performance of Diesel Engine Using Blended Crude *Jatropha* Oil. *American institute of Physics*, 1225:242-248.
- [39] Karaj S y Müller J (2011). Optimizing mechanical oil extraction of *Jatropha curcas* L. seeds with respect to press capacity, oil recovery and energy efficiency. *Industrial crops and products*, 34:1010-1016.
- [40] Karaj S y Müller J (2009). Optimization of chemical extraction of *Jatropha curcas* seeds. *Focus cropping and machinery*, 64, (3):164-167.
- [41] Parawira W (2010). Biodiesel production from *Jatropha curcas*: A review. *Scientific Research and Essays*, 5, (14):1796-1808.

- [42] Platts (2012). Solventwire. *Petrochemicals*, 35, (44):2-3.
- [43] Qian J, Shi H y Yun Z (2010). Preparation of biodiesel from *Jatropha curcas* L. oil produced by two-phase solvent extraction. *Bioresource Technology*, 101(18):7025–7031.
- [44] Quil J, Fan X y Zou H (2011). Development of biodiesel from inedible feedstock through various production processes. Review. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 47, (2):102- 111.
- [45] Raja S, Robinson D y Robert L (2011). Biodiesel production from *jatropha* oil and its characterization. *Research Journal of Chemical Sciences*, 1, (1):81-87.
- [46] Rathbauer J, Sonnletner A, Pirot R, Zeller R y Bacousky D (2012). Characterisation of *Jatropha curcas* seeds and oil from Mali. *Biomass and Bioenergy*, 47:201-210.
- [47] Sánchez (2009). *Extracción de aceites esenciales experiencia Colombiana.II Congreso Internacional de plantas medicinales y aromáticas*. Disponible en: <http://sisav.valledelcauca.gov.co> (Último acceso: 26 de noviembre de 2012)
- [48] Savoie R, Lanoisellé J y Vorobiev E (2013). Mechanical Continuous Oil Expression from Oilseeds: A review. *Food Bioprocess Technologies*, 6:1-16.
- [49] Sayyar S, Zainal Z, Yunus R y Muhammad A (2009). Extraction of Oil from *Jatropha* Seeds- Optimization and Kinetics. *American Journal of Applied Sciences*, 6, (7):1390-1395.
- [50] Serrano L (2012). Estudio de cuatro cepas nativas de microalgas para evaluar su potencial uso en la producción de biodiesel. *Tesis facultad de ingeniería - Departamento de ingeniería química y ambiental*. Universidad Nacional de Colombia.
- [51] Shivani P, Khushbu P, Thakkar V, Faldu N y Shubramanian R (2011). Extraction and analysis of *Jatropha curcas* L. seed oil. *African Journal of Biotechnology*, 10, (79):18210-18213.

# GLOSARIO

---

GEI: Gases de efecto invernadero

ETBE: Etil terciar-butil éter

UE: Unión Europea

APPA: Asociación de Empresas de Energías Renovables

Tep: Toneladas equivalentes de petróleo

Cn: Número de cetano

Wco: Aceites de fritura usados

FFA: Contenido en ácidos grasos libres

AOE: Extracciones acuosas

AEOE: Extracciones acuosas en enzimas

FAME: Cantidad de ésteres metílicos de ácidos grasos

TG: Triglicéridos

FID: Detector de ionización de llama

U: Unidad de lipasa que se utiliza para definir la cantidad de enzima que libera un micromol de p-nitrofenol por minuto en las condiciones de ensayo

CI: Motores de encendido por compresión

GC: Cromatografía de gases

KV: Viscosidad cinemática

IP: Período de inducción

BP: Potencia de frenado

BSFC: Consumo de combustible específico de frenado