



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS
MÉTODOS DE TRANSESTERIFICACIÓN Y PIROLISIS, PARA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE PROVENIENTE DE LA *JATROPHA CURCAS***

Mayra Alejandra Portillo García

Asesorado por el MSc. Ing. Edgar Leonel Ortiz Castillo

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS
MÉTODOS DE TRANSESTERIFICACIÓN Y PIROLISIS, PARA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE PROVENIENTE DE LA *JATROPHA CURCAS***

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MAYRA ALEJANDRA PORTILLO GARCÍA

ASESORADO POR EL MSC. ING. EDGAR LEONEL ORTIZ CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADORA	Inga. Lisely de León Arana
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS
MÉTODOS DE TRANSESTERIFICACIÓN Y PIROLISIS, PARA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE PROVENIENTE DE LA *JATROPHA CURCAS***

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado, con fecha 24 de julio de 2013.



Mayra Alejandra Portillo García



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142



ADSE-MEAPP-0022-2013

Guatemala, 24 de julio de 2013.

Director:

Víctor Manuel Monzón Valdez
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **Mayra Alejandra Portillo García** con carné número **2003-12660**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

Id. y enseñad a todos"

Ingeniero Civil
Colegiado 3525
MSc. Ing. Edgar Leonel Ortiz Castillo
Asesor (a)

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504
MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo/la



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EQ.TG:216.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la estudiante, **MAYRA ALEJANDRA PORTILLO GARCÍA**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TRANSESTERIFICACIÓN Y PIROLISIS, PARA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE PROVENIENTE DE LA JATROPHA CURCAS"**.
Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2013

Cc: Archivo
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TRANSESTERIFICACIÓN Y PIROLISIS, PARA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE PROVENIENTE DE LA JATROPHA CURCAS**, presentado por la estudiante universitaria: **Mayra Alejandra Portillo García**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, agosto de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi principal guía y por darme las fuerzas para concluir.
Mis padres	Hugo Castañeda y Mayra de Castañeda, por su incondicional amor y apoyo, y por ser mi fuente de inspiración.
Mi esposo	Sergio Chinchilla. Por su amor y su apoyo en todo momento.
Mis hijas	Isabella y Daniella. Por ser mis dos motores.
Mis hermanos	Manolo y Marco Portillo García. Por estar siempre presentes en mi vida y apoyarme.
Mi familia	Por ser una importante influencia en mi carrera.
Mis amigos	Por todo su apoyo y cariño a lo largo de estos años.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser mi principal amor y por darme las fuerzas para terminar la carrera.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por haberme formado como profesional, en especial a la Escuela de Ingeniería Química y Escuela de Estudios de Postgrado.
Mis papas	Por su incondicional apoyo, amor y por no dejar que me rindiera nunca.
Mi esposo	Sergio Chinchilla por su amor y su dedicación para apoyarme en todos los momentos difíciles y por disfrutar a mi lado todos los momentos de triunfo.
Mis hijas	Isabella y Daniella. Por su amor, ternura y comprensión por el tiempo que no les pude dedicar mientras culminaba este reto.
Mis hermanos	Por su apoyo y amor.
Mis amigos	Por las experiencias vividas, el cariño y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
1. INTRODUCCIÓN	01
2. ANTECEDENTES	05
3. OBJETIVOS	07
4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	09
5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	11
6. ALCANCES DEL TEMA	15
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	17
7.1. Marco conceptual	17
7.2. Energía	18
7.3. Combustibles fósiles	19
7.3.1. El carbón	19
7.3.2. El petróleo	21
7.3.2.1. Diesel	23
7.3.3. Gas natural	23

	7.3.4.	Impacto ambiental del uso de los combustibles fósiles	25
7.4.		Energías renovables	25
	7.4.1.	Biocombustibles	26
7.5.		<i>Jatropha curcas</i>	30
	7.5.1.	Proceso de producción del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	33
	7.5.2.	Transesterificación y procesamiento de metilésteres	33
	7.5.3	Pirolisis	39
8		HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	41
	8.1.	Variables dependientes.....	41
	8.2.	Variables independientes	41
9		CONTENIDO	43
10		MÉTODOS Y TÉCNICAS	47
	10.1.	Fase 1: investigación preliminar.....	47
	10.2.	Fase 2: diseño de investigación, métodos e instrumentos.....	47
	10.3.	Fase 3: análisis de datos e interpretación de resultados.....	50
11		RESULTADOS ESPERADOS	53
12		CRONOGRAMA	55
13		RECURSOS NECESARIOS	57
14		BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso de producción de biodiesel por un medio alcalino	36
2.	Reacción de transesterificación.....	37
3.	Subproductos y beneficios de la <i>Jatropha curcas</i>	38
4.	<i>Jatropha curcas</i> , desde la planta hasta la semilla oleaginosa.....	38

TABLAS

I.	Rendimiento de cultivos energéticos en 2009.....	29
II.	Características típicas del biodiesel y del diesel petrolífero.....	30
III.	Información para determinar el método	50
IV.	Recursos humanos(financiado por el estudiante-investigador)	57
V.	Materiales e insumos (financiado por el estudiante-investigador)	57
VI.	Infraestructura(financiado por el estudiante-investigador)	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO₂	Dióxido de carbono
ETBE	Etilterbutil éter
GLP	Gas licuado de petróleo
°C	Grados Celsius
g/cm³	Gramos por centímetro cúbico
kcal	Kilo calorías
Kg	Kilogramo
L/ha/año	Litros por hectárea por año
MJ	Mega Jules
MTBE	Metal terbutileter
m³	Metros cúbicos
%	Porcentaje

GLOSARIO

Energía	Capacidad de realizar un trabajo. Capacidad de obrar, transformar y poner en movimiento.
Carbón	Es una sustancia fósil, que se encuentra bajo la superficie terrestre, de origen vegetal, generada como resultado de la descomposición lenta de materia orgánica.
Petróleo	Es un combustible natural líquido constituido por una mezcla de hidrocarburos.
Diesel	Es uno de los derivados del petróleo, de alto poder calorífico y poca volatilidad. Es un combustible eficiente y seguro.
Gas Natural	Mezcla de gases que se encuentra almacenada en el interior de la tierra. Consiste en metano, etano, propano y butano.
Bio-combustibles	Productos químicos orgánicos obtenidos del procesamiento de biomasa y que son utilizados como combustibles.

- Jatropha curcas*** Especie forestal endémico de regiones especialmente áridas, perteneciente a la familia Euphorbiaceae, también conocida como piñón.
- Transesterificación** Proceso de extracción de la parte aceitosa de las especies forestales, por medio de la adición de un grupo de alcoholes en presencia de un catalizador.
- Pirolisis** Proceso de descomposición termoquímica de materia orgánica a temperaturas elevadas en un ambiente sin oxígeno.

RESUMEN

La problemática de la contaminación causada por la constante emisión de dióxido de carbono proveniente de los combustibles fósiles, también es tema importante en Guatemala al igual que en el resto del mundo. La necesidad de contribuir a la disminución de esta, lleva a la búsqueda de alternativas energéticas para la producción de energías más limpias.

El presente diseño de investigación se realiza debido a la necesidad de determinar que método para la obtención de un biocombustible proveniente de la especie forestal *Jatropha curcas* (piñón), es el de mayor eficiencia y el de mayor beneficio/costo para un proyecto de plantación de la especie forestal en mención, ubicado en la aldea Santiago, Gualán, Zacapa.

Se llevará a cabo el método de transesterificación y el método de pirolisis para la obtención de biodiesel, proveniente del piñón. Se realizarán tres corridas por cada método, para lo cual la parte experimental se llevará a cabo a nivel laboratorio.

El método de transesterificación únicamente utiliza la parte oleaginosa de la planta, la cual es aproximadamente de un 30-40% de la semilla del fruto, mientras que en el caso del método de pirolisis se utiliza el fruto completo proveniente del piñón. Con esto se busca determinar la cantidad obtenida en litros por cada método y determinar si el método que produce la mayor cantidad de volumen, cuenta con las cualidades a estudiar en el presente trabajo, que en este caso es el poder calorífico del biocombustible y que a la vez sea de beneficio para el proyecto mencionado.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los requerimientos básicos de la gestión ambiental y enfocado específicamente a la utilización de biomasa para la producción de biocombustibles.

Debido a que la contaminación ambiental constituye un área de gran preocupación para todo el planeta, se buscan alternativas para evitar el deterioro constante de la Tierra. De la mano con el crecimiento de contaminación, se encuentra el crecimiento del consumo de energía, el cual tiene como una de sus fuentes principales los combustibles fósiles, los cuales producen emisiones de dióxido de carbono causando dicha contaminación.

La demanda energética a nivel mundial constituye un área de prioridad, y en consecuencia a la problemática mencionada en el párrafo anterior, junto al rápido incremento del costo de los combustibles fósiles y en reconocimiento de la condición finita de estos mismos, se ha visto el aumento significativo del interés mundial en los recursos de energía renovable.

Dentro de los recursos de energía renovable se encuentra la biomasa a partir de especies forestales, de las cuales se pueden obtener biocombustibles, la producción de estos resulta ser muy atractiva debido a su valor tanto económico como ecológicamente amigable.

El trabajo de investigación propuesto se enfoca a la producción de biocombustibles, a partir de la especie forestal conocida como piñón(*Jatropha curcas*), teniendo como objetivo el poder comparar los métodos de transesterificación y de pirolisis (ambos métodos de transformación de biomasa).

Se realizarán pruebas a nivel laboratorio en el cual se analizarán las materias primas a utilizar, se prepararán las mismas y se procederá en el caso de la transesterificación a la extracción del aceite de las semillas del fruto de la *Jatropha curcas*, para luego proceder al análisis del mismo y se realizará la transesterificación con el alcohol y el catalizador para la obtención del biocombustible, luego se realizará la prueba de la pirolisis utilizando toda la materia prima del fruto de la *Jatropha curcas* por medio de temperaturas elevadas para obtener el biocombustible.

Seguido de la obtención del biocombustible se procederá a discusión de los resultados obtenidos de ambos procesos para determinar el de mayor eficiencia energética y de mayor beneficio de rentabilidad para el proyecto.

El marco teórico propuesto cuenta con cinco partes en las cuales se inicia con un marco conceptual respecto a lo que son los combustibles y biocombustibles en Guatemala, seguido de la descripción de la energía y de los combustibles fósiles de los cuales es necesaria su descripción, para poder comprender lo necesario que son las alternativas de nuevas fuentes de energía.

En la cuarta sección se describen las energías renovables, enfocados en los biocombustibles que es el tema que se está tratando en el presente trabajo. Se describe la producción de biodiesel a nivel mundial y a nivel nacional, las

materias primas utilizadas para esta producción y los aspectos ambientales que se toca con el tema de los biocombustibles.

La quinta parte se enfoca directamente a la *Jatropha curcas* para la producción del biocombustible describiendo los cultivos, los principales subproductos que se obtienen de este y la producción que se tiene a nivel nacional de biodiesel obtenido a partir de la *Jatropha curcas*. La producción de biodiesel por medio de la transesterificación y la pirolisis.

En el capítulo de métodos y técnicas se determina el tipo de materia prima a utilizar, con la caracterización de ésta, se describe la preparación de las mismas y se detallan las variables que describen el análisis de los métodos de transesterificación y pirolisis utilizados. Para luego entrar en el capítulo de la discusión de resultados en el cual se analiza que resultado cumple con las variables en estudio.

Para lograr el objetivo mencionado se harán tres pruebas a nivel laboratorio y con los resultados obtenidos poder determinar con qué método se aprovecha mayor cantidad de biomasa de piñón y que a la vez sea más rentable y de mayor eficiencia energética.

En la aldea Santiago, Gualán, Zacapa se lleva a cabo un proyecto de plantación de piñón para producción de biocombustibles, por lo cual esta investigación determinará el método más adecuado tanto económica como eficientemente para dicho proyecto.

2. ANTECEDENTES

Actualmente, la elaboración de biodiesel se lleva a cabo en países como Brasil, Estados Unidos y Argentina, pero es un tema tratado a nivel mundial. En Guatemala, el tema se empieza a desarrollar con estudios de investigación y proyectos financiados por el Gobierno a diferentes instituciones y como es el caso del proyecto ubicado en la aldea Santiago, Gualán, Zacapa es financiado por inversionistas de la misma.

- (Openshaw, 2000) en *Biomass & Bioenergy*, cita que la *Jatropha curcas* es una planta multipropósito con atributos y potencial considerable. Es una planta de origen tropical que puede crecer tanto en áreas lluviosas como en áreas áridas, sirve para regenerar suelos. Durante su crecimiento provee de empleo a comunidades cercanas, con lo cual se incrementa el desarrollo de áreas rurales.
- (Azurdia, 2005), en *Caracterización molecular de las variedades de Jatropha curcas L. en Guatemala con fines de mejoramiento*, reconoce que el aceite de la *Jatropha curcas* es una buena fuente, para la elaboración de combustibles biodegradables.
- Según (Machado, 2007), en *Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles*, se considera que todo proyecto que se lleve a cabo con fuente agrícola, produce beneficios para la sociedad, comunidades cercanas, y que además de ello en este caso las plantaciones de *Jatropha curcas* ayudan a recuperar suelos.

- (Monterroso, Diego Esteban; Barrientos, Kennet; Reconco, Rommel, 2012), en *Plan de negocios de una plantación de piñón (Jatropha curcas) y una planta extractora de aceite y transesterificación para producción de biodiesel en Guatemala*, citan que es una propuesta de proyecto estructurada, en el cual se enfoca al cambio del panorama energético actual, el cual se basa en la dependencia de los combustibles fósiles, brindando con éste alternativas al consumidor, como el biodiesel. Utilizando el método de transesterificación para ello.
- En el artículo publicado por la Universidad de Almería, (Navarro López, 2011), en *Bioteología de micro algas: Producción de biodiesel*, cita que uno de los procesos mejor vistos en la actualidad para la obtención del biodiesel es el método de la pirolisis de biomasa.
- La Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala (ACR Guatemala, 2012), cita que esta industria es reciente en el país, por lo que la producción aún se realiza a pequeña escala especialmente para autoconsumo en motores estacionarios o vehículos que usan diesel. Las materias primas para la producción local pueden ser la palma africana, *Jatropha curcas* (piñón), *Reicinuscommunis* (higuerillo), aceites reciclados y grasas animales. La producción de palma africana en Guatemala es de 290 000 toneladas por año, la cual abastece a Guatemala y el excedente se exporta a México en su mayoría. A corto plazo el biodiesel no se podrá producir de esta materia prima, ya que tiene prioridad “comestible” que “combustible”.

3. OBJETIVOS

General

Determinar el método más eficiente y de mayor rentabilidad entre la transesterificación y la pirolisis mediante la evaluación de producción de biocombustible a partir del piñón, para el proyecto ubicado en la aldea Santiago, Gualán, Zacapa.

Específicos

1. Determinar la eficiencia energética y la cantidad de biomasa aprovechable del fruto de la *Jatropha curcas* por el método de transesterificación.
2. Determinar la eficiencia energética y la cantidad de biomasa aprovechable del fruto de la *Jatropha curcas* por el método de pirolisis.
3. Seleccionar a partir de los datos obtenidos, el método más rentable para la producción de biocombustible.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los requerimientos básicos de la gestión ambiental y enfocado específicamente a la utilización de biomasa para la producción de biocombustibles.

Guatemala es un país que utiliza combustibles fósiles en cantidades abundantes y a partir de la problemática de la emisión de dióxido de carbono derivado del frecuente uso de mencionados combustibles, se deriva la necesidad de disminuir drásticamente su uso para apoyar las producciones limpias y evitar aumentos en la contaminación ambiental.

En consecuencia al aumento diario de contaminación a nivel mundial, se buscan alternativas que ayuden a disminuirlo, teniendo dentro de estas el uso de biomasa para producción de biocombustibles. Esta alternativa ayuda a disminuir el uso de los combustibles fósiles, causando con ello una disminución de emisiones de dióxido de carbono. La producción de biocombustibles a partir de las especies forestales que no afectan el sector de alimentos, genera biocombustibles de segunda generación, los cuales son de gran demanda por ser amigables al ambiente. Además de que producen ingresos, empleos y en el ámbito social no son mal vistos por no disminuir fuentes de alimentos a las comunidades cercanas.

El presente trabajo se realiza con el fin de apoyar a un proyecto de plantación de *Jatropha curcas*(piñón) ubicado en la aldea Santiago de Gualán, Zacapa, que tiene como objetivo principal la producción de biocombustible para proveer a una empresa generadora de energía eléctrica.

En la mayoría de los lugares o proyectos en donde se siembra el piñón para producir biocombustible, se utiliza el método de transformación llamado transesterificación, en este método se corta el fruto del piñón y únicamente se utiliza la parte oleaginosa de la semilla del fruto, quedando el resto del fruto cortado como sobrante, el cual es utilizado para producir fertilizante para el mismo sembradillo. En el proyecto de ubicarlo en la aldea Santiago, se cuenta con la siembra de piñón y con pilas de producción de tilapia, por lo cual se utiliza el agua de lavado de dichas pilas para fertilizante quedando sin uso alguno los sobrantes que provienen del fruto cortado del piñón.

Este sobrante de fruto crea la problemática de tener que desecharlo sin uso alguno, ya que este tipo de planta no puede ser utilizado en otras cosechas debido a sus propiedades tóxicas. Por otro lado el método de la pirolisis el cual consiste en la descomposición de la biomasa por la acción de calor, utiliza subproductos agrícolas y forestales y los residuos de los mismos, creando un mayor margen de utilización del fruto del piñón, disminuyendo los sobrantes del fruto cortado que actualmente no tiene uso.

Por lo anterior expuesto se justifica el objetivo del presente trabajo para determinar entre el método de transesterificación (utilizado actualmente) y el método de pirolisis (método experimental), cual es el que produce mayor cantidad de biocombustible. Determinando si el método que produce mayor cantidad también es el de mayor potencial energético y que los gastos producidos por el mejor método sean rentables para el proyecto.

5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación del medio ambiente por la emisión de dióxido de carbono producido por el frecuente uso de los combustibles fósiles tanto en Guatemala con a nivel mundial, es un tema de gran preocupación debido a que va de aumento en aumento.

Todos los derivados del petróleo son utilizados en diferentes tareas cotidianas que se realizan tanto a nivel urbano como a nivel industrial, estos producen emisiones que aumentan la contaminación ambiental diariamente, por ello se encuentra la necesidad de búsquedas alternativas para proveer combustibles de buena calidad y que a la vez sean derivados de fuentes renovables y que apoyen a la disminución de la contaminación ambiental.

El problema está enfocado básicamente a un proyecto que se dedica a la plantación de la especie forestal endémica piñón(*Jatropha curcas*), para la producción de biocombustibles, la cual tiene como uno de sus objetivos principales el proveer de combustibles de fuentes renovables, a una empresa dedicada a generar energía eléctrica, ubicada en Puerto Barrios, Izabal.

La producción de biocombustible a partir de la biomasa de especies forestales se puede realizar por varios métodos de transformación de la materia prima, dentro de los cuales se encuentran el método de transesterificación y el método de la pirolisis, ambos para obtener el biocombustible mencionado.

El proyecto de producción de biocombustible ubicado en la aldea Santiago, Gualán, Zacapa, tiene el enfoque de producir biodiesel a partir de los métodos mencionados en el párrafo anterior, para poder determinar que alternativa de producción, aumentaría significativamente la rentabilidad del proyecto. Quedando así cubiertos dos campos importantes para dicho proyecto, el campo de producción verde y la rentabilidad para los inversionistas.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se puede observar que el problema central al cual se enfoca el diseño de este trabajo es, determinar si el método de transesterificación en comparación con el método de pirolisis tiene un menor o mayor rendimiento en cuanto a biomasa aprovechable, y que al mismo tiempo sea de mayor eficiencia para el potencial energético y para el aumento de la rentabilidad del proyecto.

Con el método actual, transesterificación, de inicio se tiene una desventaja, debido a que se utiliza únicamente la parte oleaginosa de la semilla, de la cual se extrae el aceite quedando así el resto del fruto como sobrantes sólidos, los cuales en el proyecto no son utilizados para fertilizantes como normalmente se hace, ya que para ello cuentan con el agua de lavado de pilas de Tilapia. Por otro lado con el método de pirolisis se podría utilizar mayor cantidad de fruto para conversión de biomasa, pero se debe de tomar en cuenta que se busca determinar con cuál de los dos métodos se obtienen mejores resultados en cuanto al potencial energético que se obtiene, y en base a ello determinar con un análisis beneficio costo, si el método que se determine, sería el mejor a implementar.

Con todo lo anteriormente expuesto surgen las siguientes interrogantes:

- ¿Con cuál de los dos métodos(transesterificación y pirolisis) se obtiene mayor cantidad de biocombustible a partir del piñón?
- ¿Cuál es el método que produce el biocombustible de mayor eficiencia energética?
- ¿Cuál de los dos métodos en cuestión ayuda a aumentar la rentabilidad del proyecto?

6. ALCANCES DEL TEMA

Los alcances del presente informe de investigación se delimitan al proyecto de plantación de piñón ubicado en la aldea Santiago, Gualán, Zacapa, ya que actualmente dicho proyecto ya trabajó el método de transesterificación. Y la comparación de los métodos de transesterificación y de pirolisis es para determinar cuál aumenta el uso de la biomasa del fruto del piñón, cuál es el biocombustible producido de mayor eficiencia energética y que a la vez aumente la rentabilidad del proyecto. Este biocombustible producido es para proveer a una empresa que produce energía eléctrica por medio de diesel, con lo cual el proyecto estaría beneficiando a la comunidad Guatemalteca en general vendiendo a la empresa generadora de electricidad biodiesel en lugar de diesel y con esto evitando emisiones altas de dióxido de carbono.

Aparte de ello este trabajo de investigación apoya a los productores de biocombustibles a tomar decisiones en cuanto a la producción de los mismos, teniendo una alternativa probada para su producción. A la mediana y pequeña empresa el presente trabajo le brinda un apoyo para poder tener mayor información del porque se deben utilizar biocombustibles.

A la vez los alcances del presente abarcan a los investigadores del tema de alternativas energéticas y a los estudiantes de temas ambientales.

El trabajo de investigación desde la perspectiva investigativa es de carácter descriptivo y experimental, ya que se llevará a cabo la producción de biocombustible por medio de dos métodos (transesterificación y pirolisis), con el

fin de determinar cuál de los dos es el más eficiente, tras realizar un mínimo de tres corridas para cada método.

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

7.1. Marco conceptual

En Guatemala como en muchos otros países, el aspecto económico se ve severamente afectado por las fluctuaciones en los precios del petróleo y sus derivados.

En conjunto con los problemas económicos se presentan los de carácter ambiental, que se tienen día a día en constante crecimiento por el uso de los combustibles fósiles que producen grandes cantidad de dióxido de carbono. El petróleo en sus diferentes subproductos se ve involucrado en el diario vivir de las personas en todo el planeta, afectando en la mayoría de los aspectos, tales como el transporte, la energía eléctrica, servicios en general, etc.

A nivel mundial el uso de los productos derivados de petróleo, en específico, el combustible fósil es necesario debido a todos los servicios que se obtiene de este mismo, entre ellos la vital energía eléctrica que se utiliza en hogares, empresas de servicios, empresas manufactureras, restaurantes; en general en todos los lugares en los cuales se encuentran los lugares de convivencia o de trabajo.

Al igual que las diferentes formas de energía son de gran necesidad para el diario vivir, el tema de la protección al medio ambiente y la difícil tarea de cuidar de éste, está causando revuelos en la manera de producción de las empresas, llevándoles a la búsqueda de producciones más limpias, la cual incluye la búsqueda de alternativas energéticas.

A todos los problemas citados anteriormente se le buscan las soluciones como la mencionada de los biocombustibles, dentro de los cuales está el biodiesel que es una opción viable tanto para los problemas de índole económica como los de índole ambiental.

7.2. Energía

“La energía es, básicamente, la capacidad para realizar trabajo. En un sentido amplio esto significa la capacidad de obrar, transformar y poner en movimiento. Existe energía debido a la posición, el movimiento, la composición química, la masa, la temperatura y otras propiedades de la materia. Está en todas partes, y no se puede destruir, sólo transformar”. (Castro, Coello, & Castillo-Lima, 2007).

La energía en sí es la que pone todo cuerpo en movimiento, por consiguiente es fuente motora para los servicios básicos como lo son: alimentación, vestimenta, transporte entre otros.

Existen diferentes tipos de energía, dentro de los cuales se puede mencionar la energía convencional que es la que proviene de fuentes básicamente del petróleo y sus derivados. En la actualidad el tema de la eficiencia energética en los procesos y del apoyo de esta al medio ambiente ha abierto las puertas para que se aumente el interés en los biocombustibles.

7.3. Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son el carbón, el petróleo y el gas. Han sido los grandes protagonistas del impulso industrial desde la invención de la máquina de vapor hasta nuestros días. De ellos depende la mayor parte de la industria y

el transporte en la actualidad. Entre los tres suponen casi el 90% de la energía comercial empleada en el mundo. Un combustible fósil está compuesto por los restos de organismos que vivieron hace millones de años. El carbón se formó a partir de plantas terrestres y el petróleo y el gas natural a partir de microorganismos y animales principalmente acuáticos. (Hervas, www.iesvillalbahervastecnologia.wordpress.com, 2010).

7.3.1. El carbón

El primer combustible fósil que ha utilizado el hombre es el carbón. Representa cerca del 70% de las reservas energéticas mundiales de combustibles fósiles conocidas actualmente, y es la más utilizada en la producción de electricidad a nivel mundial. La disponibilidad del carbón es limitada y su calidad es baja. Es una sustancia fósil, que se encuentra bajo la superficie terrestre, de origen vegetal, generada como resultado de la descomposición lenta de la materia orgánica de los bosques, acumulada en lugares pantanosos, lagunas y deltas fluviales. (Hervas, www.iesvillalbahervastecnologia.wordpress.com, 2010).

Estos vegetales enterrados sufrieron un proceso de fermentación en ausencia de oxígeno, debido a la acción conjunta de microorganismos, en condiciones de presión y temperatura adecuadas.

A medida que pasaba el tiempo, el carbón aumentaba su contenido en carbono, lo cual incrementa la calidad y poder calorífico del mismo.

Según este criterio, el carbón se puede clasificar en:

- Turba: es el carbón más reciente. Tiene un porcentaje alto de humedad (hasta 90%), bajo poder calorífico (menos de 4000 kcal/kg) y poco carbono (menos de un 50%). Se debe secar antes de su uso. Se encuentra en zonas pantanosas. Se emplea en calefacción y como producción de abonos. Tiene muy poco interés industrial debido a su bajo poder calorífico.
- Lignito: poder calorífico en torno a las 5000 kcal/kg, con más de un 50 % de carbono (casi un 70%) y mucha humedad (30%). Se encuentra en minas a cielo abierto y por eso, su uso suele ser rentable. Se emplea en centrales térmicas para la obtención de energía eléctrica y para la obtención de subproductos mediante destilación seca.
- Hulla: tiene alto poder calorífico, más de 7000 kcal/kg y elevado porcentaje de carbono (85%). Se emplea en centrales eléctricas y fundiciones de metales. Por destilación seca se obtiene amoníaco, alquitrán y carbón de coque (muy utilizado en industria: altos hornos).
- Antracita: es el carbón más antiguo, pues tiene más de un 90% de carbono. Arde con facilidad y tiene un alto poder calorífico (más de 8000 kcal/kg). La presión y el calor adicional pueden transformar el carbón en grafito.

A través de una serie de procesos, se obtienen los carbones artificiales; los más importantes son el coque y el carbón vegetal.

7.3.2. El petróleo

Es un combustible natural líquido constituido por una mezcla de hidrocarburos, la mayor parte del petróleo que existe se formó hace unos 100 millones de años. Su composición es muy variable de unos yacimientos a otros. Su poder calorífico oscila entre las 9000 y 11000 kcal/kg. Su proceso de transformación es similar al del carbón. Procede de la transformación, por acción de determinadas bacterias, de enormes masas de plancton sepultadas por sedimentos en áreas oceánicas en determinadas condiciones de presión y temperatura.

El resultado es un producto más ligero (menos denso) por lo que asciende hacia la superficie, gracias a la porosidad de las rocas sedimentarias. Cuando se dan las circunstancias geológicas que impiden dicho ascenso se forman entonces los yacimientos petrolíferos.

El petróleo crudo carece de utilidad. Sus componentes deben separarse en un proceso denominado refino. Esta técnica se hace en unas instalaciones denominadas refinerías. Los componentes se separan en la torre de fraccionamiento calentando el petróleo. En la zona más alta de la torre se recogen los hidrocarburos más volátiles y ligeros (menor temperatura) y en la más baja los más pesados (mayor temperatura).

Del refino del petróleo se extraen los siguientes productos, comenzando por aquellos más pesados, obtenidos a altas temperaturas en la parte más baja de la torre de fraccionamiento:

- Residuos sólidos como el asfalto: para recubrir carreteras.
- Aceites pesados: para lubricar máquinas. (~ 360°C)

- Gasóleos: para calefacción y motores diesel.
- Queroseno: para motores de aviación.
- Gasolinas: para el transporte de vehículos. (20°C – 160°C)
- Gases: butano, propano,... como combustibles domésticos.

El petróleo es un combustible fósil, lo cual a su vez es una fuente no renovable de energía, cabe mencionar que a nivel mundial es una de las principales fuentes de economía por lo cual es uno de los sectores industriales más importantes en todo nivel.

“El petróleo es un líquido bituminoso espeso formado por muchos compuestos orgánicos en los que predominan cadenas de carbono e hidrógeno. Este se encuentra debajo de la superficie de la tierra y es utilizado como combustible y como materia prima en la industria química.” (Barraza López, 2007).

El petróleo es una fuente de energía de tipo no renovable, el cual es utilizado en sus diferentes formas y sus derivados. A parte de tener el problema de ser un recurso no renovable, se ve afectado el uso de este producto, debido a lo altamente contaminante que es para el medio ambiente.

Los derivados del petróleo, cabe mencionar que son los siguientes; el gas licuado de petróleo (GLP), nafta o gasolina, kerosene, diésel y crudo reducido (estos anteriores los más significativos a nivel económico). Otros derivados del petróleo son las ceras, grasas, lubricantes y asfaltos, que se obtienen del posterior tratamiento de las fracciones del crudo.

7.3.2.1. Diesel

El diesel es uno de los productos derivados del petróleo, el cual es de uso significativo debido a que se utiliza en equipos industriales, transporte pesado, en algunos vehículos livianos, para generación de energía eléctrica, etc.

“Su gran aceptación radica en su alto poder calorífico (48,81 MJ/kg) y poca volatilidad que lo hacen un combustible eficiente y seguro, comparado con la gasolina, que tiene un poder calorífico ligeramente menor (47,19 MJ/kg) y es mucho más volátil. Su uso inició cuando Rudolf Diésel, en 1892, obtuvo la patente del motor diesel en su búsqueda de un motor más eficiente que el accionado por gasolina (inventado en 1872). (Barraza López, 2007).

Combustible derivado del petróleo constituido básicamente por hidrocarburos. Puede además contener compuestos metálicos azufre por hidrocarburos, nitrógeno etc.

La calidad de diesel en términos medioambientales está definida básicamente por:

- Contenido de azufre
- SO₂, SO₃ en la combustión
- Número de cetanos

7.3.3. Gas natural

Se obtiene de yacimientos. Consiste en una mezcla de gases que se encuentra almacenada en el interior de la tierra, unas veces aisladamente (gas seco) y en otras ocasiones acompañando al petróleo (gas húmedo). Su origen

es semejante al del petróleo, aunque su extracción es más sencilla. Consiste en más de un 70% en metano, y el resto es mayoritariamente, etano, propano y butano. Es un producto incoloro en inodoro, no tóxico y más ligero que el aire. Su poder calorífico ronda las 11000 kcal/ m³.

Una vez extraído, se elimina el agua y se transporta empleando diversos métodos. Los cuales son:

- Gasoductos
- Buques cisterna

Su nivel de contaminación es bajo, comparado con otros combustibles, pues casi no presenta impurezas (algo de sulfuro de hidrógeno, H₂S, que se puede eliminar antes de llegar al consumidor) y produce energía eléctrica con alto rendimiento. Es limpio y fácil de transportar.

Los combustibles fósiles han permitido un avance sin precedentes en la historia humana, pero son fuentes de energía que se llaman no renovables. Esto significa que cantidades que han tardado en formarse miles de años se consumen en minutos y las reservas de estos combustibles van disminuyendo a un ritmo creciente. Además, estamos agotando un recurso del que se pueden obtener productos muy valiosos, como plásticos, medicinas, etc., simplemente para quemarlo y obtener energía. (Hervas, www.iesvillalbahervastecnologia.wordpress.com, 2010).

7.3.4. Impacto ambiental del uso de los combustibles fósiles

Tanto la extracción como la combustión del carbón origina una serie de deterioros medioambientales importantes. El más importante es la emisión a la atmósfera de residuos como el óxido de azufre, óxido de nitrógeno y dióxido de carbono. Estos gases se acumulan en la atmósfera provocando los siguientes efectos:

Efecto invernadero: el aumento del dióxido de carbono hace que la radiación solar entra en la atmósfera atravesando el dióxido sin dificultad; pero cuando el rayo reflejado en la tierra (que emite en infrarrojos) intenta salir, es absorbido por la atmósfera. La consecuencia es el aumento progresivo de la temperatura media.

Lluvia ácida: provocado por los óxidos de azufre y nitrógeno. Estos gases reaccionan con el vapor de agua y, en combinación con los rayos solares, se transforman en ácidos sulfúrico y nítrico, que se precipitan a la tierra en forma de lluvia. Deteriorando bosques: y la consiguiente pérdida de fertilidad de la tierra. Ríos: dañando la vida acuática y deteriorando el agua.

7.4. Energías renovables

Las fuentes de energía renovable o alternativa no consumen un recurso finito como un combustible fósil o una substancia radiactiva y además, en general, causan menos impactos ambientales negativos.

Entre estas energías se tienen:

- Energía hidroeléctrica

- Energía solar
- Energía de la biomasa
- Energía obtenida de los océanos
- Energía geotermal

El principal obstáculo que frena a estas fuentes de energía renovables es el económico, porque normalmente son más caras que los combustibles fósiles o la energía nuclear. Aunque desde otro punto de vista, no es tan claro que las energías tradicionales sean más baratas, porque si se incluyera el costo que supone limpiar la contaminación que provocan o disminuir sus daños ambientales, el precio de la energía obtenida del petróleo, carbón, gas o uranio, sería bastante más alto del que tienen en el mercado. Lo que sucede es que los estados, por motivos políticos, son los que pagan esos costes indirectos y subvencionan, directa o indirectamente, las energías no renovables.

7.4.1. Biocombustibles

El cambio constante en el mundo, hace de gran necesidad buscar las alternativas necesarias para contribuir con el medio ambiente. En esta parte del protocolo se describirán las energías alternativas actuales con las que se está buscando tener producciones más limpias. Describiendo tanto los combustibles fósiles como los alternativos.

“Son bio-combustibles aquellos productos químicos orgánicos obtenidos del procesamiento de biomasa y que son utilizados como combustibles. Los biocombustibles poseen grandes ventajas respecto a los combustibles derivados del petróleo, entre ellas se pueden mencionar: 1. Proporcionan una fuente de energía renovable y por lo tanto inagotable. 2. Disminuyen en forma notable las emisiones de CO₂, de los hidrocarburos no quemados y de materia

sólida y elimina los sulfatos por completo. 3. Revitaliza la economía rural, generando empleo y valor agregado a las cosechas”. (Barraza López, 2007).

Los biocombustibles líquidos, también denominados biocarburantes, son obtenidos a partir de la biomasa mediante procesos químicos y biológicos. Los biocombustibles líquidos son, principalmente, el bioetanol y el biodiesel, que se utilizan en el transporte y en la industria química.

Los biocombustibles en categorías:

- Biocombustibles de primera generación: son aquellos que en la actualidad a han alcanzado una etapa de producción comercial. En general, proceden de cosechas cultivadas con técnicas similares a las cosechas agrícolas alimenticias.
- Biocombustibles de segunda generación: no compiten por la utilización de suelos agrícolas, sino que son producidos a partir de biomasa ligno-celulósica como la contenida en la paja, hierba, tallos, cañas, raíces, madera, cáscaras, etc.
- Biocombustibles de tercera generación: son, principalmente, los aceites procedentes de algas y el hidrógeno procedente de la biomasa. Aún se encuentran en una fase incipiente de desarrollo y muy lejos de su producción a gran escala y, por tanto, de su comercialización, por lo que se espera que no tengan una gran producción en el corto plazo.

Biogasolina (IEA): incluye bioetanol, biometanol, bioETBE (etilterbutileter producido a partir de bioetanol; el porcentaje en volumen de bioETBE que se considera biocombustible es un 47%) y bioMTBE (metiliterbutileter producido a

partir del biometanol: el porcentaje en volumen del bioMTBE que se considera biocombustible es el 36%). La biogasolina incluye las cantidades que son mezcladas en la gasolina, pero no incluye el volumen total de gasolina mezclada. (<http://www.energiaycambioclimatico.com>, 2010).

Biodiesel (IEA): incluye el propio biodiesel, biodimetileter, Fischer Tropsch, bioaceite presionado en frío (aceite producido a partir de semillas utilizando sólo procesos mecánicos) y todo biocombustible líquido que se añade, mezcla o usa directamente como diesel para transporte. El biodiesel incluye las cantidades que son mezcladas en el diesel, pero no incluye el volumen total de diesel mezclado.

- .Biodiesel de primera generación: el biodiesel de primera generación se puede obtener a partir de aceites vegetales procedentes de semillas oleaginosas de una gran variedad de plantas: soja, colza, girasol, palma, etc. El contenido energético es de unos 36-40 GJ/Tm, un 90% del contenido energético que provee gasóleo o diesel (42 GJ/Tm), y superior al del etanol (30 GJ/Tm).
- Biodiésel de segunda generación: el biodiésel de segunda generación, también conocido como biodiésel sintético o biodiésel avanzado, es un biocombustible líquido que se produce a partir de la biomasa ligno-celulósica por medio de varios procesos termoquímicos.
- Biodiésel a partir de microalgas (tercera generación): las algas se pueden dividir, en una primera aproximación, en dos grupos muy distintos: macroalgas y microalgas. A partir de las macroalgas se obtienen una serie de productos como alimentos, vitaminas, productos farmacéuticos, etc. (<http://www.energiaycambioclimatico.com>, 2010).

Para la obtención de los biocombustibles se requiere de biomasa de especies forestales o de algún tipo de biomasa que se debe transformar o adecuar para su utilización en los diferentes métodos de producción. Según la naturaleza de la biomasa y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar diferentes métodos de obtención.

A continuación se detalla en una tabla el rendimiento por hectárea de la producción de biocombustible a partir de diferentes especies forestales en la que esta la *Jatropha curcas*.

Tabla I. **Rendimiento de cultivos energéticos en 2009**

Cultivo	Rendimiento (L/ha/año)	Tipo
Palma	5500	Biodiesel
Cocotero	4200	Biodiesel
Ricino	2600	Biodiesel
Aguacate	2460	Biodiesel
Jatropha	1559	Biodiesel
Colza	1100	Biodiesel
Soja	840	Biodiesel
Caña de azúcar	9000	Bioetanol
Remolacha	5000	Bioetanol
Mandioca	4500	Bioetanol
Sorgo dulce	4400	Bioetanol
Maíz	3200	Bioetanol

Fuente: (Barraza López, 2007).

Para poder determinar una comparativa entre el biodiesel y el diesel, se presenta a continuación una tabla con las características de ambos:

Tabla II. **Características típicas del biodiesel y del diésel petrolífero**

Datos fisicoquímicos	Biodiesel	Diésel
Composición combustible	Ester metílico ácidos grasos C12-C22	Hidrocarburo C10-C12
Poder calorífico inferior, Kcal/Kg (aprox.)	9500	10800
Viscosidad cinemática Csta 40°C	3.5-5.0	3.0-4.5
Peso específico	0.875-0.900	0.850
Azufre. % peso	0	0.2
Punto de ebullición °C	190-340	180-335
Punto de inflamación °C	120-170	60-80
Punto de escurrimiento °C	-15/ +16	-35/-15
Numero de cetano	48-60	46
Relación estequiometría aire/combustión	13.8	15

Fuente: (Ing. Larrosa, 2009).

7.5. *Jatropha curcas*

“La *Jatropha curcas* o piñón blanco pertenece a la familia Euphorbiaceae. Es un arbusto grande, de crecimiento rápido, cuya altura normal es de dos hasta tres metros, pero puede alcanzar a ocho metros en condiciones especiales” (Alfonso Baroli, 2008).

Sus hojas y frutos son tóxicos para animales y humanos, pero posee más de 150 propiedades medicinales, como purgante, tratamientos curativos, entre otras. Este cultivo es una especie arbustiva perenne por lo que su cosecha es manual. El aceite es extraído de las semillas y de los frutos y es fácilmente transformado a biodiesel, también como subproducto se obtiene el glicerol que es materia prima principal para elaborar jabones.

“De la harina, que queda como deshecho en la extracción de aceite, se pueden elaborar abonos orgánicos o alimentos para ganado vacuno, previo a una destoxificación” (Ocrospoma Ramírez, 2008).

La ventaja de la producción de la *Jatropha curcas* como antes lo menciona (Huerga, 2008), es que este tipo de especie es endémica crece en suelos áridos en los cuales no se puede sembrar ningún tipo de especie para uso alimenticio, evitando problemas en sí de índole social por afectar cosechas para alimento. A parte de dicha cualidad; la especie tiene ciertas toxinas las cuales evitan que ningún animal se trepe y se la coma, como una especie de defensa personal en contra de las plagas.

La *Jatropha curcas* es una especie oleaginosa, la cual de cada fruto se obtiene tres semillas de las cuales se adquiere la parte aceitosa de la planta para utilizar el método de la transesterificación.

7.5.1. Proceso de producción del aceite de *Jatropha curcas*

Extracción del aceite

La primera etapa en el proceso de producción de biodiesel es la extracción del aceite. Dependiendo de la escala de producción, la etapa de extracción se hace de la siguiente manera:

- Pequeña escala: por prensado en frío directamente en el campo o en cooperativas.
- Gran escala: usando solventes, dentro de plantas industriales.
- A pequeña escala, las frutas se limpian manualmente para retirarles materiales grandes como palos, tallos, hojas, basura, etc. Después se le quita la cáscara. Cuando se usan semillas, pueden ser calentadas antes de prensarlas. Las prensas pueden ser manuales o de motor.

El aceite fresco que se obtiene del prensado puede estar contaminado con pequeñas partículas de pulpa, y hay que quitarlas ya sea esperando a que se asienten o filtrándolas.

El material que queda después del prensado, que todavía tiene entre 20% y 33% de aceite, puede ser utilizado como alimento para animales o como base para la producción de biogás.

La producción a pequeña escala es de interés para las granjas y cooperativas porque ofrece un medio sencillo de obtener aceite, gas y alimento para ganado.

A gran escalase extrae el aceite con solventes. Este proceso es más eficiente pero más costoso.

Primero los frutos de *Jatropha curcas* se secan hasta tener un contenido de humedad de 5% a 7%. El ajuste de humedad es importante ya que si es más alta o baja de la que es óptima se dificulta la penetración del solvente con resultados bajos en la obtención de aceite.

Después las semillas se compactan y se calientan hasta 80°C agregándoles el solvente. El calentamiento es importante porque desactiva microorganismos presentes en el aceite y evita el coagulación de proteínas.

Normalmente se usa hexano como solvente por su disponibilidad y bajo precio. La solución con aceite y solvente se somete a un proceso de destilación para su separación. El solvente puede ser reutilizado en el proceso. La extracción con solvente produce un aceite con una pureza mayor, pero la extracción mecánica tiene un mayor rendimiento.

7.5.2. Transesterificación y procesamiento de metilésteres

Para la *Jatropha curcas* la tecnología más ampliamente usada en la producción de biodiesel es la transesterificación básica de triglicéridos descrita en el apartado anterior. Además, se recomienda una etapa de esterificación ya que el contenido de ácidos grasos libres es generalmente alto.

Se presenta una descripción detallada de la transesterificación y los pasos que le siguen. En esta parte del proceso se remueven sustancias indeseables como fosfatos, ceras, ácidos grasos libres, tocoferoles, colorantes, humedad, aldehídos, acetonas, etc. con el fin de producir un biodiesel con las propiedades

físicas y químicas adecuadas. Durante esta etapa se pierde entre un 4% y 8% del aceite.

- El primer paso es la remoción de fosfátidos o desgomado por la adición de ácido fosfórico o cítrico. Esto es necesario ya que los fosfátidos provocan turbidez y promueven la acumulación de agua.
- El segundo paso es la neutralización de los ácidos grasos libres con un catalizador básico (normalmente hidróxido de sodio). Esto produce jabón, que es insoluble con el aceite y es fácilmente separado por lavados con agua. En este paso también se remueven fenoles, compuestos grasos oxidados y metales pesados.
- El tercer paso es la remoción de colorantes que se hace por medio de materiales adsorbentes tales como: tierras diatomeas, sílice gel y carbón activado. Este paso mejora la capacidad de almacenamiento del biodiesel.
- En el cuarto paso se retiran sustancias tales como aldehídos y cetonas que provocan olores no deseados por medio de destilación con vapor.
- En el último paso, la deshidratación, se reduce el contenido de agua remanente en el biodiesel, a través de la destilación a baja presión o por absorción con nitrógeno.

El rendimiento por hectárea, después de los 5 años es de puede alcanzar hasta 5 toneladas de semilla seca por hectárea con semillas que contienen entre 35 y 40% de aceite. De estas 5 toneladas 1,8 a 2 toneladas son de aceite.

Las cáscaras de la semilla tienen un alto contenido calórico (16 MJ por kilogramo), por lo que se pueden usar o vender como combustibles en las comunidades rurales del programa de estufas eficientes. Las estufas eficientes funcionan con *pellets* de madera que tienen 18 MJ por kilogramo, es decir, sólo dos más que las cáscaras de *Jatropha curcas*. La semilla es rica en nitrógeno, fósforo y potasio, por lo que puede emplearse como fertilizante natural de los propios campos de *Jatropha curcas* o venderse para fertilizar otros cultivos. La pasta de las semillas (torta residual) tiene entre 58% y 60% de proteína cruda y aminoácidos esenciales que puede ser vendida como alimento para ganado a un 80% del precio de la pasta de soya.

Porcentajes de subproductos del proceso de producción de aceite de *Jatropha curcas*:

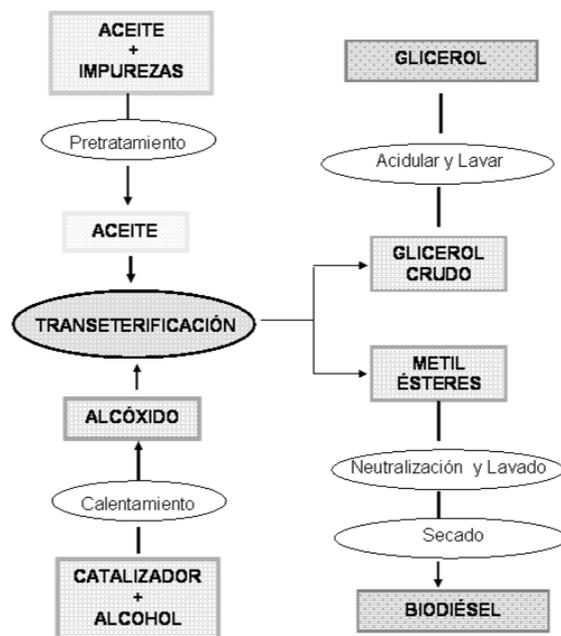
- Semillas: 65 %
- Aceite: 38 %
- Torta residual: 62 %
- Cáscaras: 35%

La transesterificación alcalina es el proceso más simple y más utilizado para obtener biodiesel. Sin embargo, requiere de un aceite con bajo contenido de ácidos grasos libres, agua y otras impurezas, o de procesos adicionales de pretratamiento de la materia prima para asegurar esta calidad. Además, requiere de pasos posteriores de postratamiento del biodiesel para reducir su contenido de impurezas procedentes del proceso, principalmente restos de catalizador, y de postratamiento de la glicerina para purificarla parcialmente e incrementar su valor de mercado. Es por esto que otros procesos han sido desarrollados para aceites menos puros, para mejorar el rendimiento de la

transesterificación, o para intentar acelerarla, pero sin embargo su uso aún no está generalizado.

La mayor parte del biodiesel se produce a partir de aceites comestibles semirefinados con buenas características de acidez y humedad. Sin embargo, existe gran cantidad de aceites y grasas de menor calidad – y menor costo – que también podrían ser convertidos en biodiesel. El problema para procesar estas materias primas baratas es que suelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres, gomas, humedad y otras impurezas que afectan el proceso de transesterificación alcalina.

Figura 1. **Proceso de producción de biodiesel por un medio alcalino**

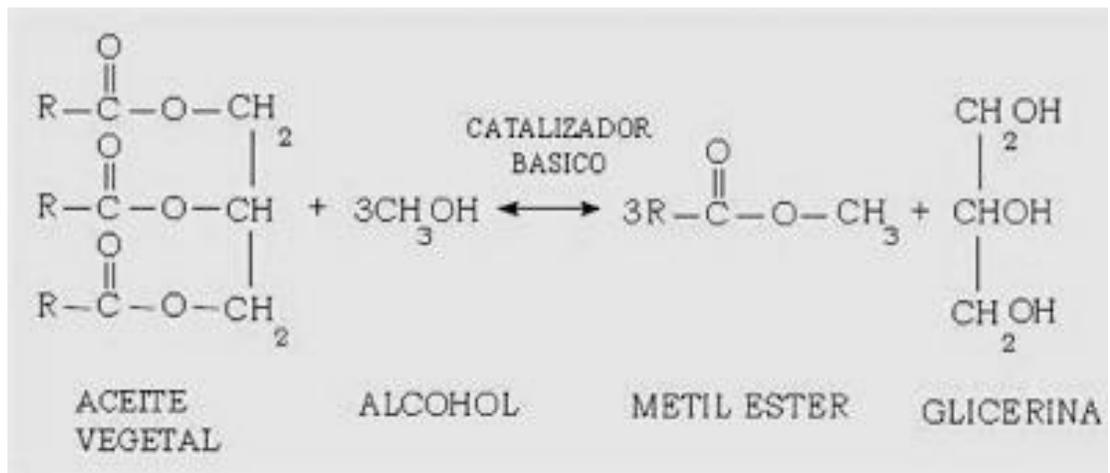


Fuente: (Orellana Ortiz, 2011).

Factores que intervienen en la reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación es afectada por diferentes factores, en dependencia de las condiciones de reacción usadas, la calidad del aceite, la presencia de ácidos grasos libres, concentración y tipo de catálisis, temperatura, tiempo de reacción y la relación molar.

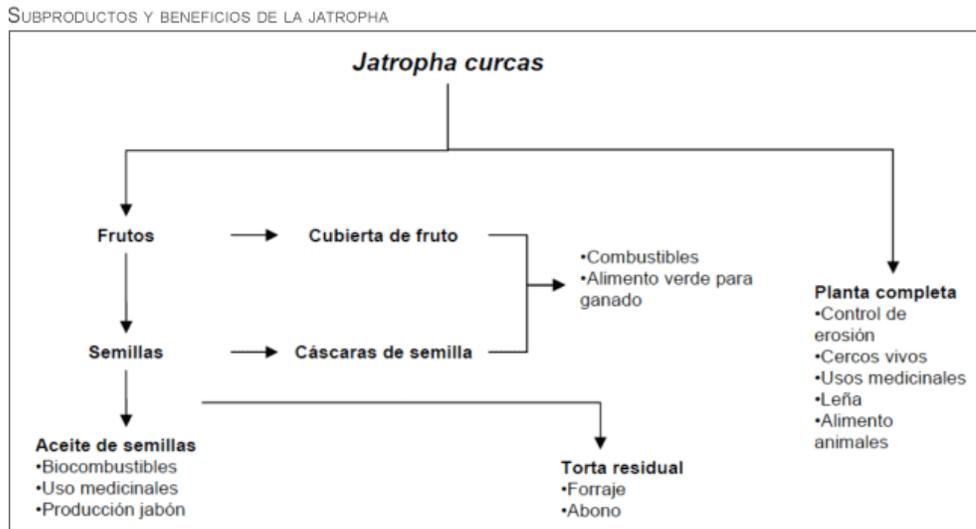
Figura 2. **Reacción de transesterificación**



Fuente: (<http://www.energiaycambioclimatico.com>, 2010).

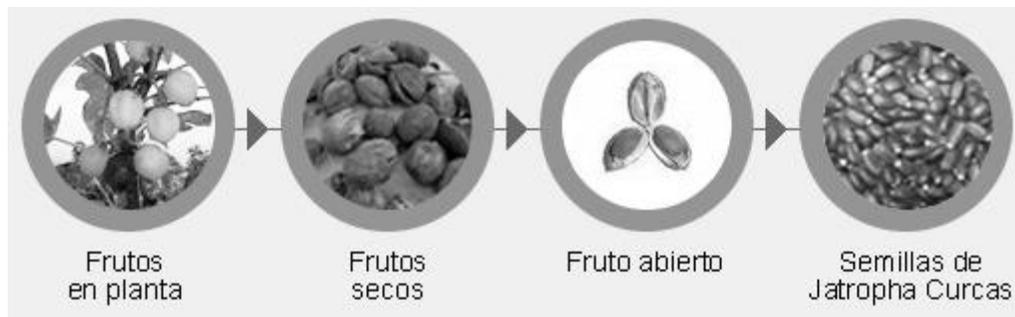
El siguiente es un esquema de los subproductos y los beneficios de la *Jatropha curcas*.

Figura 3. Subproductos y beneficios de la *Jatropha curcas*



Fuente: (Castro Rovelo, Bueso, & Acosta, 2012).

Figura 4. *Jatropha curcas*, desde la planta hasta la semilla oleaginosa



Fuente: (Energeticos, 2011).

7.5.3. Pirolisis

“Se le llama pirolisis a la descomposición termoquímica de materia orgánica a temperaturas elevadas en un ambiente sin oxígeno. Este proceso químico involucra el cambio químico y físico de estado y es irreversible. En general, la pirolisis de materiales orgánicos produce gases, líquidos y un residuo carbónico sólido.

Se ha probado que se pueden convertir los residuos de biomasa a biocombustibles de segunda generación. Estos biocombustibles pueden ser destilados de una forma parecida a sus contrapartes fósiles con un líquido similar al petróleo denominado como bio-aceite. Este bio-aceite se produce con un método de pirolisis hídrica con diferentes materias primas como estiércol de ganado y celulosos, etc.” (Kort-Kamp Figueiredo, Romeiro, & Santana Silva, 2011).

La pirolisis de las especies forestales es para producir biocombustibles de segunda generación. La *Jatropha curcas* es una especie forestal muy utilizada para la producción de biocombustibles, elevando la biomasa a altas temperaturas.

Independientemente de la verificación o no de todas estas reacciones cuando la biomasa se somete a un proceso de pirolisis se obtienen productos tales como: sólidos (carbón vegetal) Líquidos (Bio-aceite combustible) (Bio-oil). Gases combustible gaseoso de bajo o medio poder calórico).

La proporción en que se obtienen cada uno de los productos básicos de la pirolisis dependen de:

- Temperatura del reactor
- Razón de calentamiento asociada con el tamaño de la partícula
- Tiempo de residencia de los productos en el reactor
- Tecnología empleada (equipamiento) y parámetros de trabajo

Utilización de los productos de la pirolisis

El bioaceite puede sustituir los aceites combustibles o al diesel en muchas aplicaciones estáticas como calderas, hornos, motores diesel y turbinas de gas. Productos químicos están siendo extraídos o derivados del bioaceite entre los que se incluyen: aditivos para combustibles y productos para la industria como resinas.

8. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

H1. El porcentaje de conversión de biocombustible proveniente de la *Jatropha curcas* es mayor por medio del método de pirolisis que por el método de transesterificación.

H2. Hay diferencia significativa en el potencial energético del biocombustible producido con el método de transesterificación que el producido con el método de pirolisis.

8.1. Variables dependientes

El porcentaje de conversión de biocombustibles
El potencial energético del biocombustible

8.2. Variables independientes

Los métodos a utilizar para la obtención del biocombustible:

- Método de transesterificación
- Método de Pirolisis

9. CONTENIDO

El contenido general del presente trabajo de investigación se basa en el análisis de rentabilidad de un proyecto de producción de biocombustible a partir de la *Jatropha curcas*, esto debido a la comparación del método de pirolisis con el método de transesterificación. Para ello se realizará el trabajo de investigación que queda de la siguiente manera:

1. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES
2. GLOSARIO
3. RESUMEN
4. OBJETIVOS
 - 4.1. HIPÓTESIS
5. INTRODUCCIÓN
6. ANTECEDENTE
7. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

8. MARCO TEÓRICO
 - 8.1. Marco conceptual
 - 8.2. Energía
 - 8.3. Combustibles fósiles
 - 8.3.1. El carbón
 - 8.3.2. El petróleo
 - 8.3.2.1. Diesel
 - 8.3.3. Gas natural
 - 8.3.4. Impacto ambiental del uso de los combustibles fósiles

- 8.4. Energías renovables
 - 8.4.1. Biocombustible
 - 8.4.1.1. Producción y utilización del biodiesel a nivel mundial
 - 8.4.1.2. Producción nacional de biodiesel
 - 8.4.1.3. Materias primas utilizadas para producción de biodiesel
 - 8.4.1.4. Aspectos ambientales del biodiesel
- 8.5. *Jatropha curcas*
 - 8.5.1. Proceso de producción del aceite de *Jatropha curcas*
 - 8.5.2. Producción de biodiesel con *Jatropha curcas*
 - 8.5.2.1. Características del cultivo
 - 8.5.2.2. Principales subproductos.
 - 8.5.2.3. Principales usos de los subproductos
 - 8.5.2.4. Producción a nivel mundial de biodiesel con *Jatropha curcas*
 - 8.5.3. Transesterificación y procesamiento de metilesteres
 - 8.5.4. Pirolisis

9. . MÉTODOS Y TÉCNICAS

- 9.1. Materias primas a utilizar
- 9.2. Preparación de muestras
- 9.3. Extracción de aceite
- 9.4. Análisis de aceite
- 9.5. Transesterificación
- 9.6. Pirolisis

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

11. CONCLUSIONES

12. RECOMENDACIONES
13. BIBLIOGRAFÍA
14. ANEXOS

10. MÉTODOS Y TÉCNICAS

10.1. Fase 1: investigación preliminar

Esta fase de la investigación comprende la recopilación de los métodos a estudiar, los antecedentes de los mismo, lugares en donde se han llevado a cabo producciones de biocombustibles a partir de la transesterificación y la pirolisis, lo encontrado en la literatura y los requerimientos para poder determinar la eficiencia energética de cada método.

En esta sección se obtendrá la información necesaria para ejecutar las diferentes corridas de los métodos a nivel laboratorio, con el método de control y el método experimental. Se recaudará información para llevar a cabo los métodos experimentales y para determinar de qué manera se manejaran los datos obtenidos para poder concluir en base a ellos si se cumplen o no las hipótesis planteadas.

10.2. Fase 2: diseño de investigación, métodos e instrumentos

Diseño de investigación

Según la información que se puede obtener por el tipo de hipótesis y las variables a utilizar, se plantea un experimento verdadero y un diseño con posprueba y grupo de control, tal como lo plantea (Mendoza Cantú, 2010); en el capítulo 6.

Para poder determinar de qué manera se observara el experimento verdadero se tiene que tener presente la siguiente información:

Se tiene un grupo control el cual sería: el proceso de transesterificación, y a la vez se tiene un grupo experimental el cual sería: el proceso de pirolisis.

Para continuar con este tipo de experimento se tiene que tanto el porcentaje de conversión de biocombustibles como el potencial energético del biocombustible, son dependientes de lo que se logre producir a partir de los métodos de transformación, quedando estos en otras palabras, como los dos grupos posprueba, ya que dependerán de los resultados dados.

Métodos e instrumentos

Para poder determinar cuál de los dos métodos a comparar es el que aumenta la rentabilidad del proyecto de siembra de *Jatropha curcas* dentro de la aldea Santiago de Gualán Zacapa, se procederá a realizar pruebas con cada uno de ellos registrando los datos obtenidos a partir de la producción del biocombustible. En la posprueba se deberá determinar el resultado para cada una de las variables dependientes.

En sí, se busca determinar con cuál de estos dos métodos se obtendrá mayor porcentaje de conversión de biomasa para producir así mayor cantidad de biocombustible, evitando con esto la producción de desechos sólidos restantes. Con esto se podrá observar si el método convencional en este proyecto resulta como una mejor propuesta para la producción del biocombustible, aprovechando en mayor cantidad en si el fruto de la *Jatropha curcas*.

Se tendrán que tomar muestras representativas de los mismos lotes de cosechas para que no puedan intervenir factores ajenos a las pruebas en sí. Tales como condiciones climáticas, humedad, etc.

Luego se tratarán por medio del proceso de transesterificación en el cual ingresan a un proceso con alcoholes y un catalizador, el cual sería el grupo control. Y el grupo experimental se trabajara por medio del método de pirolisis en el cual se trabaja con la variable de temperatura.

Se medirá la cantidad de biocombustible producido por ambos métodos utilizando para ello métodos básicos e instrumentos de medición de volumen de producción, así como la calidad en base al potencial energético que se tendrá de cada método.

Para poder determinar de una manera justificada cual de los métodos será el más rentable y el más eficiente energéticamente hablando, se procederá a enviar a un laboratorio las muestras para trabajar en las mismas condiciones de ambiente ambos métodos.

En el caso de la transesterificación, se utilizará el metanol para la reacción de transesterificación y como catalizador se utilizara el KOH. A una temperatura de trabajo de 40°C. Utilizando un equipo Soxhlet. La materia prima será aceite crudo de la especie forestal *Jatropha curcas*, proveniente de la semilla del fruto. Aproximadamente 2,5 kilogramos por corrida, esto como se menciona se obtendrá de las semillas las cuales pasan por un proceso previo de secada por facilitar la obtención del aceite de la especie.

Mientras que para el procedimiento de la pirolisis se utilizara aproximadamente 2,5 kilogramos del fruto total de la *Jatropha curcas*, el cual

ingresará a un equipo especial para la pirolisis trabajando a temperaturas aproximadas de entre 400 a 600°C, esto debido a que el fruto ingresa húmedo al procedimiento.

10.3. Fase 3: análisis de datos e interpretación de resultados

Para poder realizar los análisis con los métodos a estudiar, se procederá a tomar muestras de la misma cosecha, 3 diferentes grupos de muestras por cada uno de los métodos, con esto se busca tomar varios factores en cuenta, ya que como en este caso se utilizar un grupo control y un grupo experimental se analizará por medio de comparación de medias y desviaciones estándar de ambos grupos (T de student), debido a que es un método de comparación ya estudiado el cual en este caso utiliza el método de transesterificación como grupo control y la pirolisis como grupo experimental y se realizarán varias pruebas para sacar un promedio el cual ayudará a evaluar eficiencias y cantidades en volumen.

Con la búsqueda de la siguiente información

Tabla III. Información para determinar el método

	Método de transesterificación	Método de pirolisis
Cantidad de biomasa obtenida, aprovechable		
Cantidad de biocombustible obtenido		
Poder calorífico del biocombustible		
Punto de inflamación		

Fuente: datos experimentales.

Los resultados se interpretarán dependiendo de los datos obtenidos por ambos grupos y a la vez dependiendo de si el método que indica los datos sería el más rentable para la empresa por la inversión inicial del mismo, hállese de instalación de equipo para producción de biocombustible por el método que indiquen los resultados numéricos en base a las variables dependientes.

Luego de ello en base a los resultados, se realizará un análisis beneficio/costo para determinar si el método más eficiente, cumple al igual con el aumento de la rentabilidad del proyecto para ya poder determinar en base a los objetivos y la hipótesis planteada los resultados esperados.

11. RESULTADOS ESPERADOS

De acuerdo a lo especificado anteriormente, los resultados esperados de la comparación de los métodos de transesterificación con el método de pirolisis, serán los siguientes:

- Poder calorífico Kcal/kg
- Peso específico g/cm^3
- Cantidad de biodiesel obtenido
- Rendimiento biomásico
- Beneficio/costo del proyecto

12. CRONOGRAMA

Fase	Actividad por semana	Agosto 2013				Septiembre 2013				Octubre 2013				Octubre 2013				Noviembre 2013				Diciembre 2013			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Recolección de muestras																								
2	Preparación de muestras para envío al laboratorio																								
3	Análisis de métodos en laboratorio																								
4	Implementación de método más rentable																								
5	Análisis de productos ya en campo																								
6	Elaboración de Informe final																								

13. RECURSOS NECESARIOS

Tabla IV. **Recursos humanos (financiado por el estudiante-investigador)**

Recurso Humano	Costo por hora	Total
Asesor	Q150	Q 2 500,00
Estudiante	Q125	Q 20 000,00
	Total RRHH	Q22 500,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Materiales e insumos (financiado por el estudiante-investigador)**

Materiales e Insumos	Costo unitario	Total
Jatropha curcas	Q. 2000,00	Q. 2 000,00
Alcohol	Q. 200,00	Q. 200,00
Catalizador	Q. 200,00	Q. 200,00
	Total materiales e insumos	Q 2 400,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Infraestructura (financiado por el estudiante-investigador)**

Infraestructura	Costo unitario	Total
Alquiler laboratorio de investigación	Q5 000,00	Q5000,00
	Total Infraestructuras	Q 5 000,00

Fuente: elaboración propia.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. ACR Guatemala, A. d. (2012). <http://www.acrguatemala.com/biodiesel.shtml>.
2. Azurdia, C. (2005). *Caracterización Molecular de las variedades de *Jatropha curcas* L. en Guatemala con fines de mejoramiento*. AGROCYT.
3. Barraza López, N. D. (2007). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ELABORACIÓN DE BIODIÉSEL, A PARTIR*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
4. Castro Rovel, F. H., Bueso, F., & Acosta, A. (2012). *Diseño de una planta de extracción, semirefinamiento y transesterificación de aceite de *Jatropha* (*Jatropha curcas*)*. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano.
5. Castro, P., Coello, J., & Castillo-Lima, L. (2007). *Opciones para la producción y uso de Biodiésel en el Peru*. Peru : Intermediate Technology Development Group.
6. commons, C. (21 de 11 de 2012). www.ecologismo.com/tag/combustibles-fosiles/.
7. Energeticos, C. (2011). www.jatrophacurcasweb.com.ar/semillas.php. Recuperado el marzo de 2013, de www.jatrophacurcasweb.com.ar

8. Germain Lefevre, A., & Ramirez Monterrosa, M. H. (2010). *Primera aproximación a las oportunidades y amenazas de los biocombustibles en Centroamérica*. San Salvador, El Salvador: Fundación Nacional para el Desarrollo, San Salvador.
9. Hervas, V. (2010). www.iesvillalbahervastecnologia.wordpress.com.
10. Hervas, V. (2010). www.iesvillalbahervastecnologia.wordpress.com. Recuperado el 2013
11. <http://www.energiaycambioclimatico.com>. (2010). *Energía y cambio climático*. Recuperado el 2013
12. Huerga, I. R. (2008). *Producción de biodiesel a partir de cultivos alternativos: Experiencia con Jatropha curcas*. Guatemala: Universidad Nacional del Litoral.
13. Ing. Larrosa, R. (2009). www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biodrev2.pdf. Obtenido de www.biodiesel-uruguay.com
14. Kort-Kamp Figueiredo, M., Romeiro, G. A., & Santana Silva, R. V. (2011). Pyrolysis Oil from the Fruit and Cake of *Jatropha curcas* Produced Using a Low Temperature Conversion (LTC) Process: Analysis of a Pyrolysis Oil-Diesel Blend. *Energy and Power Engineering; Journal Database* .
15. Machado, A. (2007). *Preguntas y respuestas mas frecuentes sobre biocombustibles*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

16. Mendoza Cantú, A. *Listado adicional al Convenio de Estocolmo: Sustancias de uso industrial*. México: Instituto Nacional de Ecología.
17. Monterroso, Diego Esteban; Barrientos, Kennet; Reconco, Rommel. (2012). *Plan de negocios de una plantación de piñon (jatropha curcas) y una planta extractora de aceite y transesterificación para producción de biodiesel en Guatemala*. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano.
18. Navarro López, E. (2011). *Bioteología de microalgas. Producción de biodiesel*. Unidad de Almería: España.
19. Openshaw, K. (2000). *Biomass & Bioenergy*. USA: Elsevier.
20. Orellana Ortiz, E. F. (2011). *Evaluación de la sostenibilidad de la producción de biodiesel a base del aceite de la semilla del piñon (Jatropha curcas)*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
21. Sampieri, M. R., Collado, C. F., & Lucio, P. B. *Metodología de la investigación*. Canadá: Mcgraw Hill.
22. UNED, U. N. (21 de 05 de 2012). www.uned.es/biblioteca/energíarenovable3/sistemashtm#biomasa. Recuperado el 21 de 03 de 2013.