



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD  
TÉCNICA DE LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, MEDIANTE  
CRAQUEO CATALÍTICO DE ACEITE DE PALMA**

**Obed Elí Marroquín Juárez**

Asesorado por el Ing. José Antonio Rosal Chicas

Guatemala, febrero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD  
TÉCNICA DE LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, MEDIANTE  
CRAQUEO CATALÍTICO DE ACEITE DE PALMA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**OBED ELÍ MARROQUÍN JUÁREZ**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ANTONIO ROSAL CHICAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Julio Chávez Montúfar
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Espinosa Smith
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

## **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 DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, MEDIANTE CRAQUEO CATALÍTICO DE ACEITE DE PALMA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 19 de septiembre de 2015.

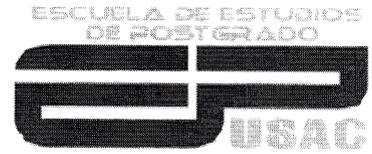


**Obed Elí Marrpquín Juárez**



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226**



**ADSE-MEAPP-011-2015**

Guatemala, 03 de noviembre de 2015.

Director:  
**Víctor Manuel Monzón**  
 Escuela de Ingeniería Química  
 Presente.

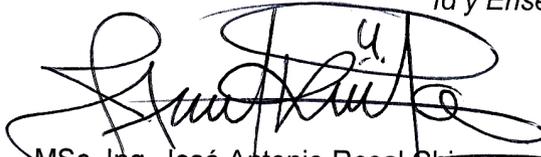
Estimado Director:

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 del (la) estudiante **Obed Elí Marroquín Juárez** carné número **94-16682**, 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 en Energía y Ambiente**.

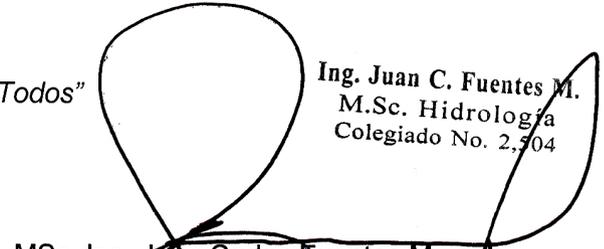
Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente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

Sin otro particular, atentamente,

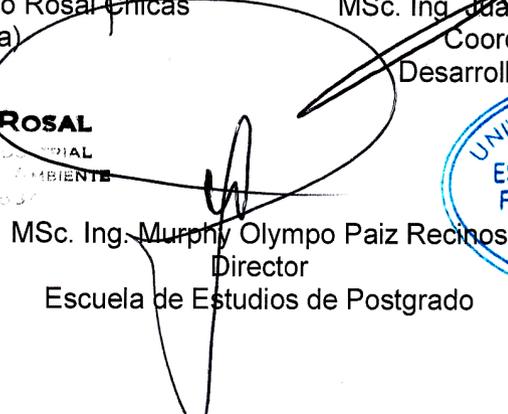
*“Id y Enseñad a Todos”*

  
 MSc. Ing. José Antonio Rosal Chicas  
 Asesor (a)

**JOSÉ ANTONIO ROSAL**  
 INGENIERO QUÍMICO ESPECIAL  
 MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE  
 COLEGIADO NO. 1037

  
 MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.  
 Coordinador de Área  
 Desarrollo social y energético

Ing. Juan C. Fuentes M.  
 M.Sc. Hidrología  
 Colegiado No. 2,704

  
 MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
 Director  
 Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo  
 /la



Ref.EIQ.TG.007.2016

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 del estudiante, **OBED ELÍ MARROQUÍN JUÁREZ**, 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 DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, MEDIANTE CRAQUEO CATALÍTICO DE ACEITE DE PALMA"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2016

Cc: Archivo  
CSWD/dle

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.061.2016

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 DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, MEDIANTE CRAQUEO CATALÍTICO DE ACEITE DE PALMA**, presentado por el estudiante universitario: **Obed Elí Marroquín Juárez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, febrero 2016

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>El Creador</b>	Principio de toda sabiduría y entendimiento.
<b>Mis padres</b>	Domingo Elí Marroquín y Mercedes Deises Juárez, su amor y dedicación son mi inspiración.
<b>Mi esposa</b>	Elizabeth López, por tu apoyo, amor y compañía en esta aventura.
<b>Mis hijas</b>	Naomi y Kyla Marroquín, las princesas que alegran mi alma.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Fuente de conocimiento.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por su valiosa influencia en mi formación académica.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Xiomara Cortez, Carlos Calderón y Freddy García.
<b>Fernando de Tezanos</b>	Por ser una importante influencia en mí, por sus enseñanzas y su amistad. Mi mentor.
<b>Ing. José Rosal</b>	Por su valioso apoyo y asesoría en la elaboración de este estudio.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
OBJETIVOS .....	XIII
Hipótesis .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
3. JUSTIFICACIÓN .....	7
4. ALCANCES .....	9
5. MARCO TEÓRICO .....	11
5.1. Conceptos y fundamentos del craqueo catalítico .....	11
5.1.1. Características químicas de aceites vegetales y biodiésel .....	11
5.1.2. Aceite de palma .....	17
5.1.3. Composición del aceite de palma .....	18
5.1.3.1. Triglicéridos .....	18
5.1.4. Ácidos grasos .....	19
5.1.5. Componentes menores .....	21

5.1.6.	Propiedades físicas del aceite de palma.....	21
5.2.	Proceso de refinado del aceite de palma.....	22
5.2.1.	Aceite de palma crudo .....	22
5.2.2.	Aceite de palma RBD .....	22
5.2.3.	Aceite vegetal comestible puro de palma .....	23
5.2.4.	Especificaciones.....	24
5.2.5.	Refinado del aceite .....	25
5.2.6.	Craqueo de aceites vegetales .....	28
5.2.7.	Mecanismo del craqueo catalítico.....	29
5.3.	Temática energética de Guatemala y uso de combustibles.....	32
5.3.1.	Biocombustibles .....	32
6.	PROPUESTA DE ÍNDICE GENERAL.....	35
7.	METODOLOGÍA.....	37
7.1.	Delimitación del campo de estudio .....	37
7.2.	Preparación del catalizador .....	37
7.3.	Preparación del aceite.....	39
7.4.	Procedimiento experimental .....	39
7.5.	Diseño experimental.....	39
7.6.	Caracterización de productos obtenidos.....	40
7.7.	Variables .....	43
7.8.	Recursos materiales disponibles .....	43
7.8.1.	Físicos.....	44
7.8.2.	Equipo y cristalería .....	44
7.8.3.	Reactivos.....	46
8.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	47
8.1.	Recolección y ordenamiento de la información .....	47

8.2.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	47
8.3.	Análisis de información .....	49
8.4.	Análisis estadístico de datos .....	51
8.5.	Programas a utilizar para análisis de datos .....	51
9.	CRONOGRAMA .....	53
10.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO Y RECURSOS .....	55
10.1.	Recursos humanos disponibles .....	55
10.2.	Recursos materiales disponibles .....	55
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Estructura de la glicerina.....	12
2.	Estructura de un ácido carboxílico sencillo.....	12
3.	Estructura del ácido decanoico .....	13
4.	Estructura de un éster .....	13
5.	Estructura de un triglicérido.....	14
6.	Molécula de un diglicérido particular .....	14
7.	Molécula de un monoglicérido particular .....	15
8.	Estructura general de un triglicérido .....	18
9.	Mecanismo simplificado de la pirólisis de aceites vegetales.....	30
10.	Mecanismo simplificado de productos de pirólisis de aceites vegetales.....	30
11.	Volúmen y participación de los combustibles de importación .....	34
12.	Esquema de preparación del catalizador .....	38
13.	Esquema de procedimiento.....	42
14.	Equipo armado para el experimento.....	45
15.	Cronograma de actividades .....	54

### TABLAS

I.	Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza.....	15
II.	Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales.....	17
III.	Componentes principales del aceite de palma .....	19

IV.	Propiedades de los ácidos grasos en el aceite de palma.....	20
V.	Propiedades físicas del aceite de palma.....	21
VI.	Especificaciones sensoriales de aceite de palma .....	24
VII.	Especificaciones físicoquímicas del aceite de palma .....	25
VIII.	Método de refinado.....	26
IX.	Comparación Interanual de productos petroleros .....	33
X.	Parámetros de control constantes y variables.....	40
XI.	Parámetros ASTM .....	40
XII.	Diagrama de actividades en la metodología .....	41
XIII.	Especificaciones del equipo utilizado.....	44
XIV.	Materiales y equipos adicionales .....	45
XV.	Reactivos para la preparación del catalizador.....	46
XVI.	Datos obtenidos de la experimentación .....	47
XVII.	Densidad de productos obtenidos según rango de destilación .....	48
XVIII.	Curvas de destilación de productos obtenidos.....	48
XIX.	Tabla de rendimientos .....	49
XX.	Especificaciones típicas para naftas .....	49
XXI.	Propiedades del <i>fuel oil</i> N.6 (bunker).....	50
XXII.	Especificaciones para combustible diésel.....	50
XXIII.	Presupuesto para la realización del experimento.....	56

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b><math>\Delta G</math></b>	Cambio de energía libre de Gibbs
<b><math>\Delta H</math></b>	Cambio de entalpía
<b><math>\Delta S</math></b>	Cambio de entropía
<b><math>^{\circ}\text{C}</math></b>	Grado centígrado
<b>g</b>	Gramo
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>mL</b>	Mililitro
<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	Óxido de aluminio
<b>ZnO</b>	Óxido de zinc
<b>SnO</b>	Óxido estannoso
<b>Wt%</b>	Porcentaje expresado en peso/peso
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto



## GLOSARIO

<b>Ácido de Lewis</b>	Sustancia capaz de aceptar un par de electrones.
<b>ASTM</b>	Siglas en inglés de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.
<b>Biocombustible</b>	Mezcla de sustancias orgánicas que se utilizan como combustible en motores de combustión interna, derivado de un proceso químico a partir de materia de origen animal o vegetal.
<b>Catalizador</b>	Substancia que acelera una reacción química.
<b>Craqueo catalítico</b>	Proceso que consiste en la descomposición térmica de una sustancia orgánica de cadena larga, en presencia de un catalizador, con el fin de producir compuestos orgánicos de cadenas más cortas.
<b>FAO</b>	Siglas en inglés de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación.
<b>Índice de Cetano</b>	Parámetro de calidad del diesel que tiene relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el intervalo de encendido. Cuanto mayor es su valor mejor es la calidad de combustible.

**Nafta**

Mezcla de hidrocarburos obtenida de la refinación del petróleo que posee una curva de destilación entre 70 y 180 °C.

**pH**

Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución, e indica la concentración de iones hidronio presentes en determinadas disoluciones.

## **RESUMEN**

En este documento se describe el diseño de investigación para determinar la posibilidad de obtener biocombustibles a partir del aceite de palma.

Los productos que se obtendrán del proceso descrito, en el diseño de la investigación, serán analizados para determinar que puedan ser utilizados como sustitutos de los hidrocarburos que actualmente requiere el parque vehicular. Esto se determinará al comparar las propiedades y características de los productos obtenidos con las naftas, diésel y bunker.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar la factibilidad técnica para la obtención de naftas, diésel y búnker mediante el proceso de craqueo catalítico del aceite de palma crudo, utilizando como catalizador una mezcla de óxido de aluminio, óxido de zinc y óxido estannoso.

### **Específicos**

1. Determinar las condiciones de temperatura de operación del proceso de craqueo catalítico en la obtención de biocombustibles a partir del aceite de palma.
2. Determinar la temperatura y cantidad de catalizador requerida en el proceso de craqueo catalítico en la obtención de biocombustibles a partir de aceite de palma.
3. Determinar las fracciones del producto obtenido según la clasificación de los hidrocarburos obtenidos de petróleo.
4. Determinar los rendimientos de los biocombustibles obtenidos mediante craqueo catalítico del aceite de palma crudo, utilizando como catalizador una mezcla de óxido de aluminio, óxido de zinc y óxido estannoso.

## **Hipótesis**

Es posible obtener biocombustibles por el proceso de craqueo catalítico del aceite de palma crudo, utilizando como catalizador una mezcla de óxido de aluminio, óxido de zinc y óxido estannoso.

## INTRODUCCIÓN

Con el presente proyecto se busca determinar la posibilidad de obtener combustibles a partir del aceite de palma por medio de un proceso de craqueo catalítico. El estudio se realizará a escala laboratorio, utilizando un catalizador formado por cantidades definidas de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) y óxido estannoso ( $\text{SnO}$ ), para la obtención de fracciones de hidrocarburos que posteriormente puedan separarse por destilación.

Este proceso consiste en la ruptura de las cadenas de triglicéridos bajo condiciones de temperatura elevada con lo que pueden obtenerse cadenas más cortas que puedan utilizarse como combustible, según las características que pueda tener cada fracción. Se realizarán curvas de destilación a los productos para determinar las fracciones de hidrocarburos presentes, que posteriormente se compararán con las especificaciones de hidrocarburos en los combustibles de origen fósil.

Se determinará el rendimiento de productos obtenidos que pueden utilizarse como combustibles a partir de la materia prima indicada anteriormente. A continuación, en el capítulo uno se hará una revisión bibliográfica sobre el craqueo catalítico, y propiedades del aceite de palma; en el capítulo dos se planteará el diseño metodológico del estudio que incluye las variables de estudio, recursos disponibles, el análisis de la información obtenida y el análisis estadístico de estos. El capítulo tres será una presentación de los resultados obtenidos.

En el capítulo cuatro se hará un análisis, descripción e interpretación de los resultados obtenidos, para luego obtener, como apartados finales las conclusiones y recomendaciones de este estudio.

## 1. ANTECEDENTES

En 1899, Rudolf Diesel probó aceite vegetal como combustible para su motor diésel. En los años 1930 y 1940, los aceites vegetales se utilizaron como combustibles diésel, pero solo en situaciones de emergencia (Knothe, 2006). Dado el embargo de petróleo en los años 70, los intereses recién descubiertos en energía alternativa han permitido que se realicen mayores investigaciones sobre este tema.

Este proceso ha sido ampliamente estudiado a principios del siglo XX, llegando a ser utilizado para suprimir el uso de combustibles de origen fósil durante la década de 1940 en China (Chang, 1947). Además de ser un artículo de revisión publicado en Brasil, incluso en la década de 1940 (Otto, 1945), donde se abordan diversos estudios realizados entre la Primera y Segunda Guerras Mundiales. Desde entonces, numerosos estudios sobre la pirólisis térmica (Alencar, 1983; Fortes, 1994; Fortes, 1999; Idem, 1996; Schwab, 1988) y catalíticos (Costa, 1998; Prasad, 1986; Katikaneni, 1998) se han realizado.

Csicsery (1995) había esbozado varios retos que la industria química enfrentaría durante las próximas décadas. Uno de ellos es la disminución del suministro de materias primas y por lo tanto, la creciente necesidad de utilizar otras fuentes disponibles como el gas natural, gas de síntesis y la biomasa.

Debido a las limitaciones del clima, la mayoría de las investigaciones se limitaron a aceite vegetal, que son de producción casera, como el aceite de girasol en Turquía, el aceite de nuez en Nigeria y el aceite de canola en Canadá

(Prasad y Bakhshi, 1985; Prasad et al., 1986a, b; Adjaye y Bakhshi, 1995a, b, c; Katikaneni et al., 1995; Idem et al., 1997).

La mayoría de las investigaciones realizadas sobre la conversión de aceite de palma está utilizando refinado, blanqueado, desodorizado (RBD) de aceite de palma. Esto se debe a su alta viscosidad, que causa problemas como la combustión incompleta, la atomización pobre del combustible y carbonización en los inyectores de combustible si se utiliza directamente sin tratamiento (De Filippis et al., 1995). Se han utilizado diversos catalizadores para la conversión catalítica de aceite de palma a los combustibles diversos, especialmente ZSM-5 (Ani y Salam, 1995; Tan et al., 1997,1999; Twaiq et al., 1999).

La acidez y la selectividad de los catalizadores de forma se rigen por diversos factores, como la acidez, el tamaño de los poros y su distribución y forma de los poros (Twaiq et al., 1999; Adjaye y Bakhshi, 1995a). “Beta” e “Y” son ambas zeolitas de poro grande y de naturaleza ácida. Corma et al. (1988) estudiaron la actividad y la selectividad de la zeolita Beta y la comparó con zeolita Y.

El uso de zeolita en el craqueo catalítico ha sido objeto de estudio y varios han sido comercializados. El redescubrimiento de los materiales MCM-41 en 1992 (Kresge y col., 1992), ha provocado un gran interés de los investigadores en catálisis porque hay una necesidad de materiales como la zeolita con un tamaño de poro más grande para procesar de manera eficiente los hidrocarburos más pesados. Este material ha sido sintetizado utilizando diferentes métodos como hidrotermales, sol-gel, los injertos y la plantilla de método de intercambio catiónico (Siti Kartina, 2006). La diferencia en los métodos de síntesis da como resultado características distintas en la acidez del catalizador y por lo tanto, en la actividad del catalizador.

La caracterización de los productos líquidos y gaseosos indica la presencia de parafinas, olefinas lineales y cíclicas, aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos, siendo notable que esta composición se vea alterada por la presencia de catalizadores heterogéneos. Debe tenerse en cuenta que los ácidos carboxílicos, aldehídos y cetonas son subproductos de craqueo proveniente de la parte glicerídica del triglicérido, y el tamaño y grado de insaturación de los compuestos orgánicos obtenidos dependerá de la estructura carbonada de los triglicéridos y de las reacciones consecutivas de los productos formados (Gusmao, 1989).

El mecanismo de reacción fue propuesto inicialmente por Chang, (1947) y confirmada más recientemente por Gusmao, (1989). En condiciones de reacción, los triglicéridos se rompen dando lugar a la formación de ácidos carboxílicos, acroleína y cetenos.

Los cetenos y acroleína se descomponen fácilmente con la formación de ésteres, ácidos carboxílicos y los hidrocarburos. En consecuencia se produce una descomposición térmica de los ácidos carboxílicos, que pueden ocurrir por decarbonilación o descarboxilación, teniendo en el primer caso, la formación de agua, monóxido de carbono y un hidrocarburo con una insaturación nueva terminal, y el segundo, el de dióxido de carbono y una de hidrocarburos, sin la formación de nuevos insaturados (Gusmao, 1989).

En el caso del aceite de soja, el craqueo directo en un aparato de destilación llevó a la formación de una mezcla con índices de cetano entre 37,9 y 43, y viscosidad de 10,2 cSt a 38 °C (Schwab, 1988). Vale la pena mencionar que a pesar de que la mezcla contiene un 10 % en ácidos carboxílicos de masas (índice de acidez 132), el combustible líquido obtenido está dentro de los parámetros válidos para la corrosión del cobre (Schwab, 1988).

Para cambiar la selectividad de los productos de pirolisis de triglicéridos, cuyo principal objetivo es eliminar el oxígeno, se han adoptado diferentes estrategias, especialmente el uso de catalizadores heterogéneos. Se ha observado que la presencia zeolitas favorece la desoxigenación de productos de la descomposición térmica de los aceites; sin embargo también se observa que se ven favorecidas las reacciones consecutivas de ruptura de cadenas alifáticas, obteniendo así productos de menor punto de ebullición, especialmente en el rango de la gasolina y los compuestos aromáticos (Idem, 1997; Santos, 1998; Sharma, 1991).

Se obtuvieron mejores resultados utilizando espinelas de óxido de aluminio ( $\gamma$ -alúmina), o equivalente, compuesto de óxidos mixtos de silicio y el aluminio como catalizadores (Ídem, 1997) y se observó una disminución en la división de cadenas alifáticas y la formación de compuestos aromáticos. Ya los procesos combinados de craqueo e hidrogenación, empleando óxidos de molibdeno y níquel soportados en alúmina, llevó a la formación casi exclusivamente de hidrocarburos (Gusmao, 1989).

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso del aceite vegetal como combustible líquido ha sido un el tema de interés entre los investigadores. La crisis del petróleo a mediados de los años 80 solo sirvió para mejorar la labor de explorar varias posibilidades para convertir el aceite vegetal en combustibles líquidos. El aceite vegetal tiene una alta viscosidad y esto llevaría a una serie de problemas en los motores. (Knothe, 2006).

La introducción de la forma catalítica selectiva (Weisz et al., 1979) en aceite vegetal craqueado fue importante porque abrió un nuevo horizonte en la catálisis por zeolitas. Desde entonces, el craqueo de los aceites vegetales se realizó mediante tamices moleculares y los resultados fueron alentadores (Prasad y Bakhshi, 1985; Prasad et al., 1986a, b; Adjaye y Bakhshi, 1995a, b, c; Ani y Salam, 1995; Twaiq et al., 1999).

La zeolita conocida como ZSM-5 era de uso frecuente, como catalizador utilizada sola o en combinación con otros tipos de zeolitas. Sin embargo, el uso de zeolita microporosa limita su uso a las moléculas pequeñas. Así, el descubrimiento de materiales mesoporosos (Beck y cols., 1992) fue crucial en la catálisis. Este material tiene su aplicación en el craqueo de moléculas más grandes (Siti Kartina, 2006), aunque su acidez es más débil.

Se ha demostrado que el aceite de palma podría ser convertido a gasolina utilizando catalizadores de forma selectiva, según lo informado por varios investigadores (Ani y Salam, 1995; Tan et al., 1997, 1999; Twaiq et al. 1999). Sin embargo, los productos líquidos obtenidos con estos catalizadores fueron

enriquecidos en compuestos aromáticos, que deben ser eliminados a fin de obtener combustible "limpio" (Ani y Salam, 1995; Tan et al., 1997, 1999; Twaiq et al. 1999).

Por lo tanto, la adición de hidrógeno podría servir para aumentar la actividad de hidrogenación, mientras que disminuye la formación de coque (Shishido y Hattori, 1996a). Los retos se sitúan en el uso eficaz del hidrógeno, ya sea antes o durante el craqueo como diluyente.

En este mismo sentido se persigue la investigación de nuevos catalizadores que permitan obtener un mayor grado de selectividad y un menor grado de envenenamiento. Esto es lo que se busca al utilizar un catalizador con presencia de estaño y níquel, lo que permite conocer otra alternativa en este campo de investigación.

De tal cuenta se plantea la pregunta principal de la investigación: ¿Será factible técnicamente la obtención de biocombustibles utilizando el proceso de craqueo catalítico a partir de aceite de palma utilizando el catalizador propuesto? Esta pregunta deriva en preguntas que deben responderse antes con este fin, como: ¿Cuáles son las condiciones de temperatura y cantidad de catalizador que se requieren para craquear catalíticamente el aceite de palma para la obtención de biocombustibles? ¿Cuáles son las fracciones de los productos obtenidos con base en la clasificación de los hidrocarburos obtenidos del petróleo? ¿Cuál es el rendimiento de los biocombustibles que pueden obtenerse del aceite de palma por tratamiento de craqueo catalítico?

### 3. JUSTIFICACIÓN

Dado el aumento de la contaminación ambiental y los gases de efecto invernadero, es necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de combustibles que sean más amigables con el ambiente y a la vez que sean renovables. Así también el aumento constante y acelerado del uso de los derivados del petróleo en el mundo conlleva a la búsqueda de otras fuentes para sustituirlo y que permita obtenerlo a precios accesibles.

Es por estas razones que se realiza el actual estudio para determinar la factibilidad técnica del uso de aceite de palma para la obtención de combustibles denominados verdes (*green*) que no requiera de hacer cambios en el parque automotriz actual y a la vez mostrar que Guatemala puede producir sus propios combustibles, y así minimizar el efecto del precio internacional sobre los combustibles dentro del país.

La línea de investigación en la que se enmarca el estudio propuesto es en el área de biocombustibles, como fuente de energía no fósil. Esto permitirá conocer alternativas renovables al uso de hidrocarburos.



## 4. ALCANCES

Este estudio está delimitado a una escala de nivel laboratorio, ya que lo que se persigue es comprender y estudiar los fenómenos que se dan y de esa manera realizar posteriormente estudios más minuciosos de cada una de las variables involucradas en el proceso de craqueo. Es por esta razón que el estudio es del tipo cuantitativo exploratorio y experimental.

Se establecerán las condiciones de temperatura de reacción, velocidad de agitación, así como la cantidad de catalizador estaño-níquel a utilizar en la mezcla reaccionante.

Se determinarán algunas propiedades fisicoquímicas de fracciones que se obtendrán para conocer si es posible clasificarlas como naftas, diésel y bunker en base a la curva de destilación, la densidad y el rendimiento de cada una de estas fracciones.

Se compararán los productos obtenidos con los respectivos equivalentes de base petróleo y sus especificaciones dadas por las normas ASTM D86, D1298, y D976-91.

Al finalizar el estudio, los resultados obtenidos serán de beneficio para todo aquel investigador que desee profundizar en otras alternativas para la obtención de biocombustibles, así como a aquellos productores de aceites vegetales que busquen utilizar este recurso renovable como un medio de generación de combustibles.



## **5. MARCO TEÓRICO**

### **5.1. Conceptos y fundamentos del craqueo catalítico**

El concepto técnico del biodiésel y su proceso de producción presupone el conocimiento de algunos conceptos de la química orgánica. El biodiésel es producido a partir de aceites y grasas vegetales o grasas de origen animal y, por lo tanto, es necesario conocer esas grasas desde el punto de vista químico. De forma general, se emplea la palabra aceite para los líquidos y grasas o gorduras para las que son sólidas en condiciones ambientales, aunque sean químicamente similares.

Los triglicéridos son ésteres de ácidos grasos. El aceite de cada especie vegetal posee una combinación de diferentes triglicéridos, que son moléculas grandes, compuestas por esterificación de 3 ácidos grasos, los cuales pueden ser iguales o distintos. En el anexo también se muestran las estructuras de los principales ácidos grasos presentes en los aceites y grasas, así como su participación porcentual en diversos aceites vegetales y grasas animales.

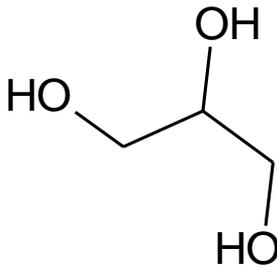
#### **5.1.1. Características químicas de aceites vegetales y biodiésel**

Los aceites vegetales y grasas animales son lípidos. Los lípidos son constituidos básicamente por mezclas de diferentes triglicéridos, que contienen otros compuestos tales como mezclas de mono y diglicéridos, ácidos grasos libres y fosfolípidos. Los ácidos grasos que componen un triglicérido pueden ser diversos. Mono, di o triglicéridos son ésteres de uno, dos o tres ácidos

grasos, iguales o no, unidos por un puente de glicerina. El biodiésel es una mezcla de alquil-ésteres de ácidos grasos. En las figuras de abajo se aprecian ejemplos de cada una de las especies químicas citadas, empezando por las más simples.

La glicerina o 1,2,3, propano triol es uno de los subproductos de la fabricación del biodiésel.

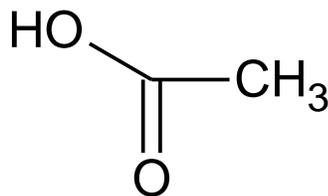
Figura 1. **Estructura de la glicerina**



Fuente: elaboración propia.

Los ácidos carboxílicos son caracterizados por el grupo – COOH; la figura 2 muestra el ácido acético uno de los más simples

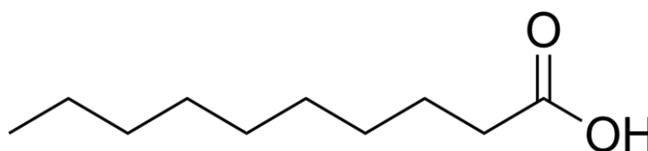
Figura 2. **Estructura de un ácido carboxílico sencillo**



Fuente: elaboración propia.

Los ácidos grasos son ácidos orgánicos de cadena carbónica lineal, en general formados de 4 a 24 átomos de carbón. La figura 3 presenta la estructura de un ácido graso libre (*Free Fat Acid* – FFA) de 10 carbonos.

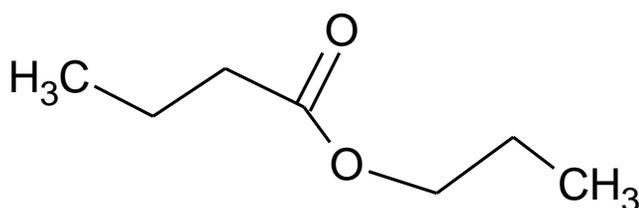
Figura 3. **Estructura del ácido decanoico**



Fuente: (McMurry, J. "Química orgánica", 2008. p. 624)

Los ésteres son caracterizados por la estructura  $R - COO - R'$ , donde R y R' son radicales orgánicos unidos por el "puente" - COO -, como se puede ver en la figura 4 de abajo.

Figura 4. **Estructura de un éster**

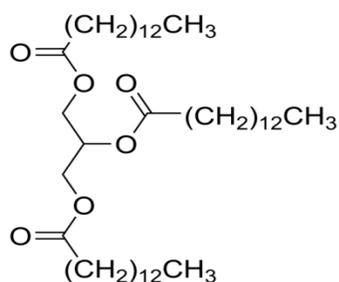


Fuente: elaboración propia.

La figura 5 presenta la estructura de un triglicérido. Los tres ácidos grasos de este particular ejemplo no son iguales. Cuando los enlaces carbón/carbón son simples, se dice que el triglicérido es saturado. La existencia de uno o más enlaces dobles en la cadena carbónica lo caracteriza como insaturado o poliinsaturado. La existencia de uno o varios enlaces dobles en la estructura

molecular tiene influencia en las propiedades del triglicérido, propiciando la existencia de isómeros (cis – trans) y afectando el punto de fusión del lípido (los conformados por ácidos saturados tienden a ser sólidos a temperatura ambiente).

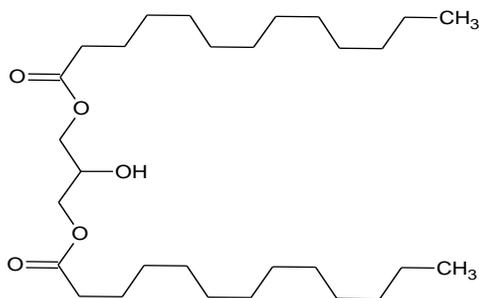
Figura 5. **Estructura de un triglicérido**



Fuente: McMurry, J. "Química orgánica" 2008. p.106.

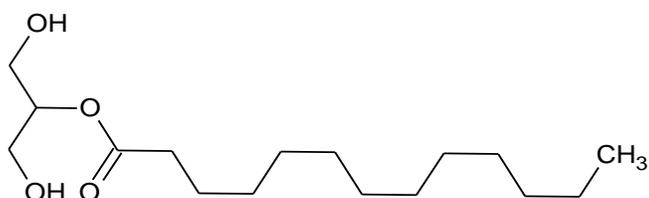
Los mono y diglicéridos son provenientes de una reacción parcial del triglicérido original. Las figuras 6 y 7 abajo muestran su estructura.

Figura 6. **Molécula de un diglicérido particular**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Molécula de un monoglicérido particular**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla I se muestra los principales ácidos grasos con su nombre común, su nomenclatura IUPAC, su símbolo reducido y su fórmula mínima.

Tabla I. **Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza**

Nombre usual	Nombre IUPAC Ácido	Símbolo	Fórmula mínima
Butírico	Butanoico	C4:0	C4.H8.O2
Caproico	Hexanoico	C6:0	C6.H12.O2
Caprílico	Octanoico	C8:0	C8.H16.O2
Cáprico	Decanoico	C10:0	C10.H20.O2
Otusalílico	Cis-4-decenóico	C10:1(n4)	C10.H18.O2
Caproleico	Cis-9-decenóico	C10:1(n9)	C10.H18.O2
Láurico	Dodecanoico	C12:0	C12.H24.O2
Lauroleico	Cis-5-dodecenoico	C12:1(n5)	C12.H22.O2
Lindérico	Cis-4-dodecenoico	C12:1(n4)	C12.H22.O2
Mirístico	Tetradecanoico	C14:0	C14.H28.O2
Miristoleico	Cis-9-tetradecenóico	C14:1(n9)	C14.H26.O2
Tsuzuico	Cis-4-tetradecenóico	C14:1(n4)	C14.H26.O2
Palmitico	Hexadecanoico	C16:0	C16.H32.O2
Palmitoleico	Cis-9-tetradecenóico	C16:1(n9)	C16.H30.O2
Esteárico	Octadecanoico	C18:0	C18.H36.O2
Petroselínico	Cis-6-octadecenóico	C18:1(n6)	C18.H34.O2
Oleico	Cis-9-octadecenóico	C18:1(n9)	C18.H34.O2
Eládico	Trans-9-octadecenóico	C18:1(tn9)	C18.H34.O2
Vaccínico	Cis-11-octadecenóico	C18:1(n11)	C18.H34.O2
Linoleico	Cis-9-cis-12-octadecadienóico	C18:2(n9,n12)	C18.H32.O2
Linolénico	Cis9-cis12-cis15-octadecatrienóico	18:3(n9,n12,n15)	C18.H30.O2
Ricinoleico	12-hidroxi-cis-9-octadecenóico	C18:1(n9):OH(n12)	C18.H34.O3

Araquídico	Icosanoico	C20:0	C20.H40.O2
Gadoleico	Cis-9-icosenóico	C20:1(n9)	C20.H38.O2
Gadoico	Cis-11-eicosenóico	C20:1(n11)	C20.H38.O2
Araquidónico	Cis-6-cis-9-cis-12-cis15-eicostetraenóico	C20:4(n6,9,12,15)	C20.H32.O2
Behénico	Docosanoico	C22:0	C22.H44.O2
Cetoleico	Cis-11-docosenóico	C22:1(n11)	C22.H42.O2

Fuente: Ribeiro, Waldyr. *"Perspectivas para el biodiésel en CA"*. p.194-199.

Los aceites y grasas se caracterizan por la composición y proporción de los distintos ácidos grasos descritos arriba. En la tabla II se muestra la composición de algunos aceites vegetales y grasas animales, en términos de sus principales ácidos grasos.

Es de notarse que los aceites más empleados para producir el biodiésel están fuertemente concentrados en ácidos con 16 o 18 átomos de carbón en sus cadenas (ácidos palmítico, esteárico, oleico, linoleico o ricinoleico).

Llama la atención el caso del aceite de higuierillo, que posee fuerte concentración de ácido ricinoleico, ya que posee en su estructura un grupo hidroxilo en su cadena, que le confiere propiedades muy distintas de todos los demás, en particular por el poder lubricante que le confiere y elevada viscosidad. (FAO, 1997)

Tabla II. **Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales**

Aceite	Ácidos grasos					Otros %
	C16 %	C18 %	C18:1n9 %	C18:2n9 12 %	C18:1n9 OH(n12)	
Algodón (a)	17-23	1-3	23-41	34-55	---	0-5
Maní (a)	8-10	1-4	30-50	34-56	---	0-4
Canola (a)	5	2	58	21	---	14
Colza (d)	2-5	1-2	10-15	10-20	---	55-70
Palma (b)	32-47	1-6	40-52	2-11	---	1-6
Girasol (a)	6	4	19	69	---	2
Higuerillo (c)	2	1	3	5	88	1
Coco (c)	7-10	1-4	5-8	1-3	---	75-86
Soya (b)	7-11	3-6	22-34	50-60	---	11-22
Oliva (d)	14	---	76	10	---	---
Maíz (d)	8-10	1-4	30-50	34-56	---	1-4
Jatropha (e)	16	10	41	32	---	1
Grasa ganado (d)	23-29	21-26	39-42	2	---	4-11
Grasa cerdo (d)	25-30	12-16	41-51	4-22	----	5-18
Aceite usado (e)	17	12	55	8	---	8

Fuente: CEPAL. *Perspectivas de la producción de biodiesel en CA*.  
[www.cepal.org/publicaciones/xml/3/29423/l791-3.pdf](http://www.cepal.org/publicaciones/xml/3/29423/l791-3.pdf) Consulta: febrero 2015.

El aceite que es interés para este estudio es el aceite de palma por lo que se detalla a continuación la composición general de este aceite.

### 5.1.2. Aceite de palma

El aceite de palma se obtiene del mesocarpio del fruto de la palma. El aceite está constituido en su mayoría de triglicéridos. El restante está compuesto por un 0,5 % aproximadamente de diglicéridos, 0,1 % de ácidos

grasos libres o FFA por sus siglas en inglés, 0,3 % de esteroides, 0,1 % de tocoferoles y fosfolípidos y pigmentos a nivel de partes por millón (ppm). Por tanto su composición química define las características físicas y químicas del aceite (Siti, 2006).

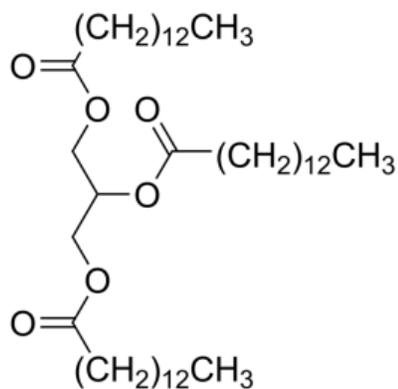
### 5.1.3. Composición del aceite de palma

A continuación se describen los componentes principales del aceite de palma.

#### 5.1.3.1. Triglicéridos

Estos son constituidos por ácidos grasos combinados con otras moléculas formando ésteres. Principalmente los ésteres están constituidos por una molécula de glicerina en la que se han sustituido los átomos de hidrógeno por la cadena de ácidos grasos en la terminal carboxílica (McMurry, 2008. p. 1061), como muestra la figura 8.

Figura 8. Estructura general de un triglicérido



Fuente: McMurry, 2008. p. 1061.

#### 5.1.4. Ácidos grasos

Los ácidos grasos son cadenas largas de ácidos carboxilados constituidos por cadenas de 2 a 30 átomos de carbono, sin embargo los C<sub>16</sub> y C<sub>18</sub> son los más comúnmente encontrados. Los ácidos grasos saturados usualmente tienen cadenas lineales con un número par de átomos de carbono.

Los ácidos grasos insaturados se limitan a cadenas C<sub>16</sub> y C<sub>18</sub> con 1,2 o 3 enlaces dobles en su estructura (Hart, 1987). Los ácidos grasos que componen principalmente el aceite de palma se presentan en la tabla III.

Tabla III. Componentes principales del aceite de palma

Ácido Graso (Carbonos: Enlace doble)	% del Total	
	Media	Rango Observado
Ácido Láurico (12:0)	0.23	0.1-1.0
Ácido Mirístico (14:0)	1.09	0.9-1.5
Ácido Palmítico (16:0)	44.02	41.8-46.8
Ácido Palmitoleico (16:1)	0.12	0.1-0.3
Ácido Esteárico (18:0)	4.54	4.2-5.1
Ácido Oleico(18:1)	39.15	37.3-40.8
Ácido Linoleico (18:2)	10.12	9.1-11.0
Ácido Linolénico (18:3)	0.37	0-0.6
Ácido Aracídico (20:0)	0.38	0.2-0.7

Fuente: Siti Kartina Binti Abdul Karim, *Effect of temperature and hydrogen on palm oil cracking over mcm-41/zsm-5 composite catalyts*. p.35.

De la anterior tabla puede verse que cerca del 50 % de los ácidos grasos presentes en el aceite de palma son saturados y 50 % son insaturados. Este balance entre saturados e insaturados determina el valor de yodo del aceite y confiere cierta estabilidad a la oxidación al aceite comparado con otros aceites vegetales (Chong, 1993).

Las propiedades físicas de los ácidos grasos dependen de la longitud de la cadena y el grado de insaturación. En los ácidos grasos saturados el punto de fusión se incrementa con el número de átomos de carbono. Para los insaturados, el punto de fusión disminuye con el incremento de dobles enlaces. En la tabla IV se presentan algunas propiedades de los ácidos grasos que constituyen el aceite de palma.

Tabla IV. **Propiedades de los ácidos grasos en el aceite de palma**

Ácido Graso	Índice de Refracción	Peso Molecular	Punto de Fusión (°C)	Punto de Ebullición (°C)	Densidad (g/ml)
Láurico	1.4304 <sup>50</sup>	200.32	44	225 <sup>100</sup> ,131 <sup>1</sup>	0.8679 <sup>50/4</sup>
Mirístico	1.4723 <sup>70</sup>	228.38	53.9	250 <sup>100</sup>	0.8622 <sup>54</sup>
Palmítico	1.4335 <sup>60</sup>	256.43	63	350,267 <sup>100</sup>	0.8527 <sup>62/4</sup>
Palmitoleico		254.41	1	131 <sup>0.06</sup>	
Esteárico	1.4299 <sup>20</sup>	284.48	71-2	360d,232 <sup>15</sup>	0.9408 <sup>20/4</sup>
Oleico	1.4582 <sup>20</sup>	282.47	16.3	286 <sup>100</sup> ,228-9 <sup>15</sup>	0.8935 <sup>20/4</sup>
Linoleico	1.4699 <sup>20</sup>	280.45	-5	229-30 <sup>16</sup>	0.9022 <sup>20/4</sup>
Linolénico	1.4800 <sup>20</sup>	278.44	-11.3	230 <sup>17</sup> ,129 <sup>0.05</sup>	0.9164 <sup>20/4</sup>
Araquídico	1.425 <sup>100</sup>	312.54	77	328d,203-5 <sup>1</sup>	0.8240 <sup>100/4</sup>

Fuente PERRY, R., GREEN, D. *Manual del ingeniero químico*. p.3-28 y 3-55.

### 5.1.5. Componentes menores

Entre los componentes que se encuentran en menor proporción, como ya se mencionó, incluye los esteroides, tocoferoles, fosfolípidos y pigmentos. Todos estos componentes constituyen menos del 1 % del aceite. Estos tienen un rol significativo en la estabilidad y refinabilidad del aceite. El aceite crudo de palma (ACP) contiene tocoferoles y tocotrienoles en el rango de 600 a 1000 ppm. (Siti, 2006). Estos son antioxidantes y proveen una protección natural al aceite.

### 5.1.6. Propiedades físicas del aceite de palma

Es importante identificar ciertas propiedades físicas del aceite de palma para caracterizarlo, tales como la densidad, índice de refracción, *flash point*, punto de niebla, punto de anilina y su pureza. La tabla V presenta varias propiedades físicas importantes del aceite de palma.

Tabla V. Propiedades físicas del aceite de palma

Propiedades Físicas	Media	Rango
Densidad a 50 °C (g/ml)	0.889	0.888-0.889
Índice de Refracción a 50 °C	1.455	1.455-1.456
<u>Contenido de grasa sólida</u>		
5 °C	60.5	50.7-68.0
10 °C	49.6	40.0-55.2
15 °C	34.7	27.2-39.7
20 °C	22.5	14.7-27.9
25 °C	13.5	6.5-18.5
30 °C	9.2	4.5-14.1
35 °C	6.6	1.8-11.7
40 °C	4.0	0.0-7.5
45 °C	0.7	-
Punto de Fusión (°C)	34.2	31.1-37.6
Humedad e Impurezas (wt%) <sup>a</sup>	0.1 Max.	-
Flash Point (°C)	310	-
Cloud Point (°C)	6	-

Fuente: BASIRON, Y. (1996). *Palm Oil*. In: Hui, Y.H. ed. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products (Volume 2)*. Canada: John Wiley and Sons, Inc. p. 271-376.

## **5.2. Proceso de refinado del aceite de palma**

Se describe a continuación el proceso de refinado del aceite en las etapas más importantes.

### **5.2.1. Aceite de palma crudo**

Es el producto semisólido de aspecto graso a temperatura ambiente, de color anaranjado rojizo, obtenido por el procesamiento de los frutos de la palmera *Elaeis guineensis* y proveniente del mesocarpio de estos frutos (FAO, 1997). El procesamiento de los frutos se lleva a cabo en las siguientes etapas:

- Esterilización
- Remoción de tallos
- Digestión del fruto
- Prensado y remoción de almendras
- Tamizado
- Sedimentación y separación de lodos
- Centrifugación
- Secado al vacío

### **5.2.2. Aceite de palma RBD**

Es el producto semisólido, de aspecto graso y color blanco amarillento, obtenido a partir del aceite de palma crudo cuando este se somete a los procesos de:

- Refinación por vía física o química
- Blanqueo y/o pretratamiento
- Deodorización

El aceite de palma RBD generalmente se obtiene previo a la comercialización y transporte del aceite de palma para preservar su calidad durante su tiempo de almacenamiento y transporte y previo a su uso final en la formulación de mantecas vegetales o grasas comestibles o a su proceso final de refinación para la producción de aceite vegetal comestible puro de palma (FAO, 1997).

### **5.2.3. Aceite vegetal comestible puro de palma**

“Es el producto semi-sólido, de aspecto graso y color blanco, obtenido cuando el aceite de palma RBD se somete a un proceso final de refinación que puede incluir blanqueo y desodorización. También es el producto obtenido cuando el aceite de palma crudo se somete a un proceso completo de refinación por vía física o química y que puede incluir las etapas de desgomado, neutralización química, lavado, secado, blanqueo y pretratamiento por adsorción y desodorización” (FAO, 1997).

#### 5.2.4. Especificaciones

El aceite de palma en sus diferentes tipos debe de cumplir con las especificaciones de las características sensoriales y físicoquímicas marcadas en las tablas VI y VII.

Tabla VI. **Especificaciones sensoriales de aceite de palma**

Parámetros	Aceite de palma crudo	Aceite de palma RBD	Aceite vegetal comestible puro de palma
Color visual	Anaranjado rojizo en estado líquido	Blanco amarillento en estado sólido	Blanco en estado sólido
Aspecto	Graso en estado semisólido	Graso en estado semisólido	Graso en estado Semisólido
Textura	Grasosa, característica del producto en estado semisólido	Grasosa, característica del producto en estado semisólido	Grasosa, característica del producto en estado semisólido
Apariencia	Semisólido, característico a 293 K	Semisólido, característico a 293 K	Semisólido, característico a 293 K
Sabor	Típico, no agradable	Típico, variable de acuerdo a tiempo de almacenamiento	Característico, exento de sabores extraños o rancios,

Fuente: Ministerio de Economía de México

<http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2005/proy-nmx-f-019-scfi-2005.pdf>. Consulta: enero 2015.

Tabla VII. **Especificaciones físicoquímicas del aceite de palma**

Parámetros	Aceite de palma crudo		Aceite de palma RBD		Aceite vegetal comestible puro de palma	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Color rojo escala Lovibond	NA	NA		3.5		3.5
AGL % como ácido palmítico	NA	5.0		0.1		*0.05
I. de yodo (cg yodo/g)	50.1	54.9	50.1	54.9	50.1	54.9
Humedad y mat. volátil %		0.5		0.1		*0.05
I. de refracción nD a 313 K (50 °C)	1.4544	1.4550	1.4544	1.4550	1.4544	1.4550
Punto de fusión (capilar abierto) °C	33.0	39.0	33.0	39.0	33.0	39.0
Ind. De saponificación mg KOH/g	190	209	190	209	190	209
Materia insaponificable %	0	1.2	0	1.2	0	1.2
Índice de peróxido meq/kg	NA	NA		2.0		*1.0
Estabilidad OSI a 110 °C (horas)	NA	NA	NA	NA	*10	
Densidad relativa a 50 °C/agua a 20 °C	0.891	0.899	0.891	0.899	0.891	0.899
Aceite mineral	NEGATIVO					

Fuente: Ministerio de Economía de México.

<http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2005/proy-nmx-f-019-scfi-2005.pdf>. Consulta: enero 2015.

### 5.2.5. Refinado del aceite

“El refinado produce un aceite comestible con las características deseadas por los consumidores, como sabor y olor suaves, aspecto limpio, color claro,

estabilidad frente a la oxidación e idoneidad para freír. Los dos principales sistemas de refinado son el refinado alcalino y el refinado físico (arrastre de vapor, neutralización destilativa), que se emplean para extraer los ácidos grasos libres. El método clásico de refinado alcalino comprende normalmente las siguientes etapas” (FAO, 1997):

Tabla VIII. **Método de refinado**

<b>1<sup>a</sup> etapa</b>	Desgomado con agua. Permite eliminar los fosfolípidos hidratables, sales y los metales presentes.
<b>2<sup>a</sup> etapa</b>	Acidificación. Adición de ácido fosfórico o cítrico en baja concentración para convertir los fosfolípidos no hidratables (sales de Ca, Mg) en fosfolípidos hidratables.
<b>3<sup>a</sup> etapa</b>	Neutralización. Los ácidos grasos libres son tratados con un exceso de hidróxido de sodio en solución. Lavado posterior, para eliminar los jabones y fosfolípidos hidratados formados.
<b>4<sup>a</sup> etapa</b>	Blanqueo. Con carbón activado y/o tierras minerales naturales o activadas con ácido para eliminar el color y descomponer hidroperóxidos.
<b>5<sup>a</sup> etapa</b>	Desodorización. Elimina los compuestos volátiles, principalmente aldehídos y cetonas. Básicamente es un proceso de destilación con arrastre de vapor a presiones entre 2 a 6 milibares y temperaturas entre (180-220 °C).

Fuente: FAO. <http://www.fao.org/docrep/V4700S/v4700s09.htm>. Consulta: enero 2015.

“En algunos aceites, se obtiene un producto de mayor claridad con una etapa de eliminación de ceras o de cristalización de los ésteres de ceras realizado a baja temperatura, posteriormente es filtrado o centrifugado. El proceso de neutralización alcalina tiene importantes inconvenientes, el rendimiento es relativamente bajo y se producen pérdidas de aceite debido a la

emulsión y saponificación de los aceites neutros. También se genera una cantidad considerable de efluente líquido. Los jabones se tratan usualmente con ácido sulfúrico, recuperándose los ácidos grasos libres junto con sulfato sódico y vapor de agua ácida que contiene grasa” (FAO, 1997).

En el refinado físico, los ácidos grasos se eliminan por medio de destilación al vapor (arrastre) similar a la desodorización. La baja volatilidad de los ácidos grasos, la cual depende de la longitud de la cadena, requiere temperaturas más elevadas que las utilizadas para la desodorización. En la práctica, una temperatura máxima de 240-250 °C es suficiente para reducir el contenido de ácidos grasos libres a niveles de alrededor del 0,05-0,1 por ciento.

Un requisito previo del refinado físico es que se eliminen los fosfátidos hasta un nivel inferior a los 5 mg de fósforo/kg de aceite. En el proceso de refinado clásico este nivel se consigue fácilmente en la etapa de neutralización, pero se requiere un proceso especial de desgomado para el refinado físico de las semillas oleaginosas con alto contenido en fosfátidos. “Estos procedimientos se basan en una hidratación mejorada de los fosfolípidos mediante un contacto íntimo entre el aceite y una solución acuosa de ácido cítrico, ácido fosfórico y/o hidróxido sódico, seguida de blanqueo” (Segers y van de Sande, 1988).

La neutralización también contribuye considerablemente a eliminar contaminantes, tales como las aflatoxinas y los organofosforados. (Thomas, 1982). “Los plaguicidas organoclorados y los hidrocarburos aromáticos policíclicos, si están presentes, deberán eliminarse durante la etapa de desodorización/arrastre y mediante un tratamiento con carbón activo” (Gertz, 1988; Johansson y Hoffmann, 1979).

### 5.2.6. Craqueo de aceites vegetales

El craqueo es un método comúnmente utilizado en la industria de los aceites y gas para convertir moléculas complejas en moléculas más simples y pequeñas. Existen tres procesos usualmente empleados: el craqueo térmico, el craqueo catalítico y el hidrocraqueo. El craqueo térmico utiliza calor en ausencia de catalizador, mientras que el catalítico utiliza ambos elementos para romper cadenas largas de hidrocarburos en otras de menor tamaño. El hidrocraqueo utiliza una combinación de catalizador e hidrógeno a una determinada presión y temperatura que son normalmente más bajas que las utilizadas en los procesos anteriormente descritos.

El craqueo de aceites vegetales para producir combustibles no es un proceso nuevo. Desde la década de 1920 ya existen intentos por producir combustibles de este tipo conocidos como biodiésel (Janlus, 1984; Mukti *et al.*, 1984; Ma *et al.*, 1996; Ikwuagwu *et al.*, 2000; Altin *et al.*, 2001); Crabbe *et al.*, 2001).

La pirólisis de distintos triglicéridos fue el método utilizado por diferentes países durante la primera y segunda guerra mundial. China, durante la Segunda Guerra Mundial produjo hidrocarburos a partir de la pirólisis del aceite de Tung (Chang *et al.*, 1942).

Los hidrocarburos obtenidos de este proceso se utilizaron como materia prima para la producción de gasolinas y diésel en sistemas de craqueo similares a los procesos ahora utilizados en el petróleo. En el craqueo catalítico se ha reportado que la selectividad está fuertemente influenciada por la presencia y la naturaleza del catalizador heterogéneo y la presencia de vapor

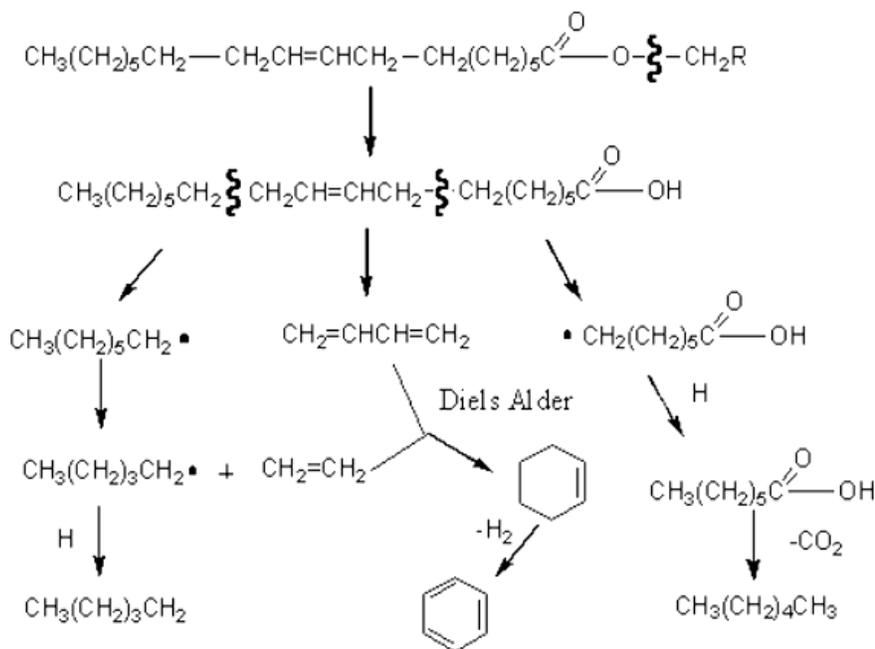
de agua (da Costa, S.R.R. *et. al.*1998; Prasad, Y.S. *et. al.*1986; Bakhshi, N.N. *et. al.*,1998).

### **5.2.7. Mecanismo del craqueo catalítico**

La variedad de caminos de reacción e intermediarios hace difícil describir los mecanismos de reacción. Además de la multiplicidad de posibles reacciones de la mezcla de triglicéridos hace de las reacciones de pirólisis más complicadas. Generalmente, la descomposición térmica de estas estructuras, procede a través de radicales libres o iones carbonio (Srivastava y Prasad, 2000).

La figura 9 muestra un esquema de reacción con formación de alcanos, alquenos, alcadienos, aromáticos y ácidos carboxílicos a partir de la pirólisis de triglicéridos (Srivastava y Prasad, 2000). En el caso de los aceites vegetales se presentan dos caminos posibles basados en los productos obtenidos y las condiciones de reacción que pueden utilizarse. Uno de los mecanismos es el siguiente, presentado por C. Zhenyi *et al.* (Energy Sources, 2004.849) como sigue.

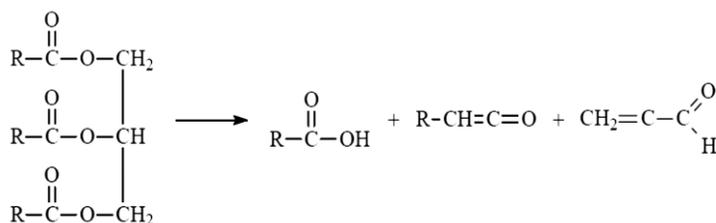
Figura 9. **Mecanismo simplificado de la pirólisis de aceites vegetales**



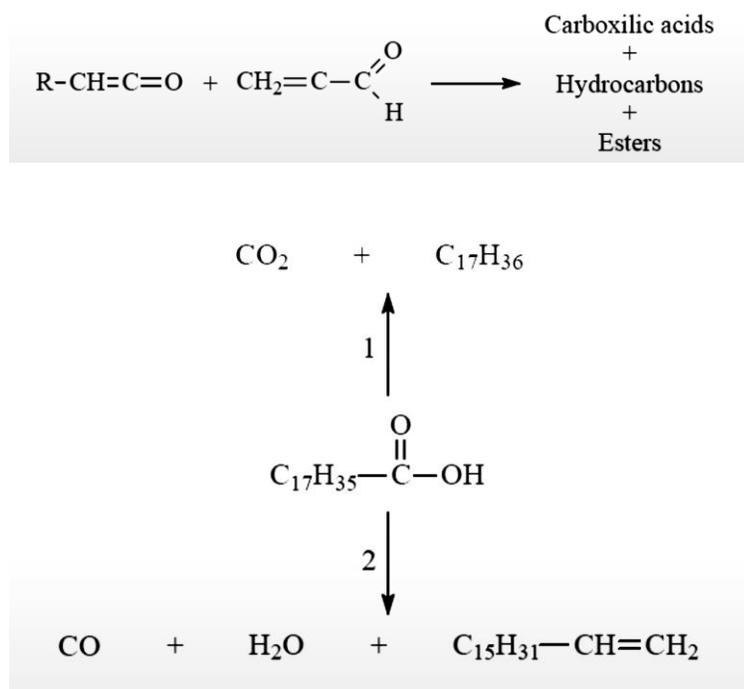
Fuente: Zhenyi, Cheng et.al. "Thermodynamics calculation of the pyrolysis of vegetable oils" Energy Sources (26):851, 2004.

El otro camino de reacción es el presentado por Gusmão J. *et al.* (Catalysis Today, 1989.533) en el que se definen productos específicos y se describe de manera sencilla.

Figura 10. **Mecanismo simplificado de productos de pirólisis de aceites vegetales**



Continuación de figura 10.



Fuente: Gusmão J. et al. (*Catalysis Today*), 1989. p. 533.

En el presente trabajo se tomarán como referencia estos dos caminos de reacción. Las condiciones de reacción se determinan calculando las propiedades termodinámicas del ácido carboxílico más representativo y utilizando el método de contribuciones de grupo de Joback. Tal como lo presenta Zhao y Jin (1983; C. Zhenyi *et al.*, 2004,849).

Con este método se obtienen los valores de energía libre de Gibbs de, capacidades caloríficas a presión constante entalpías de formación de productos y reactivos, así como la entropía de reacción de los mismos. Y utilizando la expresión:

$$\Delta G_{r,T}^{\circ} = \Delta H_{r,T}^{\circ} + T\Delta S_{r,T}^{\circ} \quad [1]$$

Con base en este método se determina que la temperatura para realizar la reacción de una manera aceptable inicia a 300 °C.

### **5.3. Temática energética de Guatemala y uso de combustibles**

A continuación se describe información que permite conocer sobre la temática energética relevante en Guatemala.

#### **5.3.1. Biocombustibles**

Las tecnologías actuales para la producción de biocombustibles han sido direccionadas únicamente a la obtención de biodiésel, bioetanol, y biogás como los principales productos. Puede decirse que estos representan los biocombustibles de primera generación. Con la búsqueda de nuevos métodos, actualmente puede encontrarse lo que se denominan biocombustibles de segunda generación que involucran procesos para su producción más elaborados y combinación de tecnologías ya utilizadas en la industria del petróleo.

En este estudio el enfoque va dirigido a la obtención de biocombustibles de segunda generación por medio del craqueo catalítico del aceite de palma, el uso de aceites vegetales posee ventajas para Guatemala que pueden dividirse en 3 áreas:

- Ventajas medioambientales, puesto que su producción contribuye a reducir la emisión de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>).

- Ventajas energéticas, ya que son fuente de energía renovable que permite disminuir la dependencia de combustibles fósiles, que en el caso de Guatemala, son en su totalidad importados.
- Ventajas socioeconómicas, ya que se permite una diversificación energética, el uso de plantaciones como cultivos energéticos, ya que este proceso no se limitaría únicamente al uso de aceite de palma, sino a toda aquella fuente de aceites vegetales, comestibles o no, con lo que puede evitarse la erosión del suelo, y fomentar la creación de trabajo en áreas rurales, permitiendo que los pequeños productores puedan también vender sus producciones a quienes realizan los proyectos.

A continuación se presenta una tabla con los volúmenes importados por combustible en Guatemala, según el reporte del Ministerio de Energía y Minas.

Tabla IX. **Comparación interanual de productos petroleros**

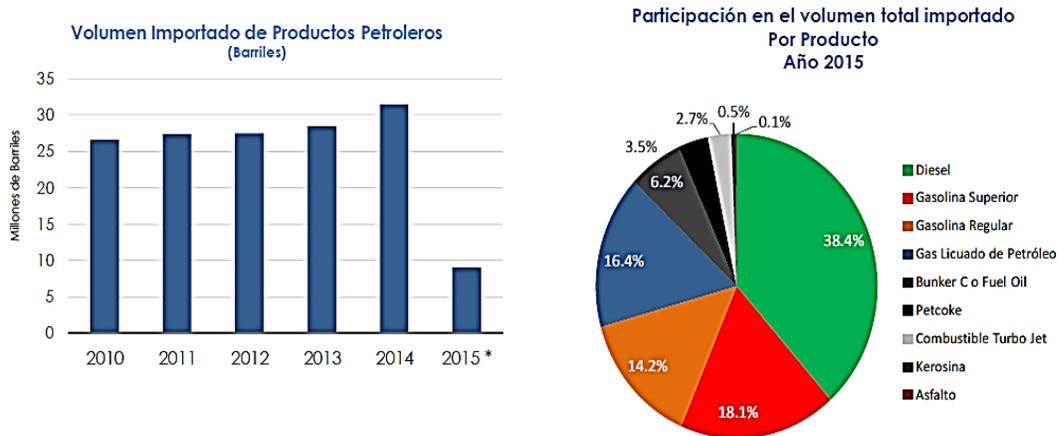
Unidad de medida: Barriles

Producto	2010	2011	2012	2013	2014	2015 *
Gas Licuado de Petróleo	3,979,823.2	4,073,975.0	4,304,669.1	4,915,256.3	4,873,213.0	1,468,023.4
Gasolina de Aviación	15,370.0	13,801.0	13,799.2	15,312.9	44,233.5	0.0
Gasolina Superior	5,212,706.4	4,733,637.7	4,877,062.8	5,015,279.9	5,734,521.2	1,622,660.5
Gasolina Regular	3,358,398.3	3,268,362.3	3,046,599.5	3,585,079.3	4,403,119.3	1,278,205.3
Kerosina	593,385.4	589,729.2	591,016.6	771,962.2	1,025,771.2	42,615.9
Combustible Turbo Jet	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	238,305.0
Diesel	9,011,131.7	9,219,828.1	9,549,888.5	9,599,152.3	10,503,248.6	3,357,993.8
Diesel de Bajo Azufre	0.0	0.0	0.0	161,745.7	481,499.9	86,600.1
Bunker C o Fuel Oil	3,796,035.5	4,179,310.9	3,879,270.0	3,167,976.9	3,082,862.2	557,909.6
Asfalto	78,914.4	100,093.0	97,014.6	39,679.1	82,752.3	11,811.1
Petcoke	625,389.2	1,184,988.5	1,114,503.4	1,154,786.8	1,279,415.8	313,017.6
<b>TOTAL</b>	<b>26,671,154.04</b>	<b>27,363,725.81</b>	<b>27,473,823.74</b>	<b>28,426,231.27</b>	<b>31,510,636.91</b>	<b>8,977,142.22</b>

\* Datos de 2015, comprenden los meses de Enero, Febrero y Marzo.

Fuente: MEM. Informe estadístico 2015, p.12.

Figura 11. **Volúmen y participación de los combustibles de importación**



Fuente: MEM. Informe estadístico 2015, p.12.

Como puede verse en la tabla anterior el volumen de diésel está alrededor de diez millones de barriles anuales, la importación de gasolinas en nueve millones de barriles y la importación de bunker es de cinco millones de barriles anuales aproximadamente.

Esta dependencia en los combustibles tiene un alto impacto en nuestro país al haber cambios en los precios internacionales que encarecen el transporte y los procesos productivos.

Con el uso de biocombustibles dentro de la matriz energética en Guatemala, puede disminuirse la dependencia de combustibles fósiles, lo que permitiría desarrollarse a largo plazo en procesos industriales, independientemente de lo que suceda en los países productores de petróleo.

## 6. PROPUESTA DE ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE

PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

RESUMÉN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Conceptos y fundamentos del craqueo catalítico

1.1.1. Características químicas de aceites vegetales y biodiésel

1.1.2. Aceite de Palma

1.1.3. Composición del aceite de palma

1.1.3.1. Triglicéridos

1.1.4. Ácidos grasos

1.1.5. Componentes menores

1.1.6. Propiedades físicas del aceite de palma

#### 1.2. Proceso de refinado del aceite de palma

1.2.1. Aceite de palma crudo

1.2.2. Aceite de palma RBD

1.2.3. Aceite vegetal comestible puro de palma

- 1.2.4. Especificaciones
- 1.2.5. Refinado de aceite
- 1.2.6. Craqueo de aceites vegetales
- 1.2.7. Mecanismo del craqueo catalítico
- 1.3. Temática energética y uso de combustibles en Guatemala
  - 1.3.1. Biocombustibles En Guatemala

## 2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

## 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

ANEXOS

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1. Delimitación del campo de estudio**

Este estudio está delimitado a una escala de nivel laboratorio, ya que lo que se persigue es comprender y estudiar los fenómenos que se dan en el proceso de craqueo catalítico del aceite de palma y de esa manera realizar posteriormente estudios más minuciosos de cada una de las variables involucradas en el proceso de craqueo. Es por esta razón que el estudio es de tipo cuantitativo exploratorio y experimental.

Se establecerán las condiciones de temperatura de reacción, velocidad de agitación, así como la cantidad de catalizador estaño-níquel a utilizar en la mezcla reaccionante.

### **7.2. Preparación del catalizador**

Para la preparación del catalizador se parte de que el mismo debe contener una proporción en peso 80:10:10 de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :ZnO:SnO, respectivamente.

El hecho de considerar el uso de estas proporciones se basa en los resultados obtenidos en la pirólisis de aceites de soya y palma refinados, que se muestran en Suarez, P. *et al* (2006, para publicación) bajo la justificación de ser materias primas iniciales fácilmente adquiridas en forma local como por el valor en costo respecto de otros catalizadores utilizados para procesos pirolíticos de aceites vegetales (Suarez, P, et al, 2004,987-996).

El catalizador se preparará utilizando como bases iniciales el clorhidróxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{Cl}(\text{OH})_5$ , el cloruro estannoso dihidratado,  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y el sulfato de zinc heptahidratado  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . La mezcla se agrega a 1000 mL de una solución 0.75 M de carbonato de sodio. Se mantiene en agitación hasta reacción completa por 1 hora. Se deja reposar hasta precipitar completamente los sólidos. En este estudio el catalizador será preparado con clorhidróxido de aluminio y no con nitrato de aluminio como se puede ver en Suarez, P. *et al* (2006, para publicación).

Se realizaran lavados del sólido hasta alcanzar neutralidad ( $\text{pH} = 7$ ). Se seca y se pesa el sólido obtenido y se colocará en horno a  $200\text{ }^\circ\text{C}$  por 2 horas para eliminar hidratación, y convertir los hidróxidos en los óxidos respectivos. Debe cuidarse la temperatura que no debe superar los  $250\text{ }^\circ\text{C}$  ya que esto ocasionaría que el  $\text{SnO}$  se oxide a  $\text{SnO}_2$ . A continuación un diagrama esquemático de la preparación del catalizador.

Figura 12. **Esquema de preparación del catalizador**



- La mezcla se deja con agitación constante a temperatura ambiente por 30 minutos luego se deja en refrigeración por 12 horas;
- El coprecipitado resultante se aísla por filtración y se lava varias veces con agua limpia;
- El coprecipitado lavado se seca y se activa térmicamente.

Fuente: elaboración propia.

### **7.3. Preparación del aceite**

Se pesa una cantidad deseada de aceite de palma, y se calienta hasta 150 °C para eliminar el agua que pueda contener. Esta es fácil de identificar por las burbujas formadas a la temperatura de ebullición del agua. Cuando estas dejan de formarse ya se ha eliminado completamente la misma.

### **7.4. Procedimiento experimental**

- Se coloca en un balón de fondo plano 500 gramos de aceite de palma, y se agrega 3 % en peso del catalizador preparado.
- Agitar durante todo el proceso de reacción vigorosamente.
- Colocar condensador de reflujo de tal manera que los vapores formados por la reacción retornen al balón y el aceite que no haya reaccionado no se destile por arrastre.
- Mantener una temperatura de 350 °C en el balón por 4 horas.
- Colocar en una probeta 400 mL de metanol y agregar 0,5 a 1 % de un ácido de Lewis (ácido clorhídrico, ácido sulfúrico,  $\text{BF}_3$ ) al metanol. Este servirá como trampa para hacer reaccionar la acroleína formada durante la reacción de craqueo (ver figura 13).
- Proceder a destilar la mezcla reaccionante.
- Repetir todos los pasos anteriores variando el paso 7.

### **7.5. Diseño experimental**

Se presentan a continuación los parámetros de control del experimento.

Tabla X. **Parámetros de control constantes y variables**

Cuadro de Parámetros de medición			
Experimento	Parámetros constantes	VARIABLES de control	Rangos
Craqueo de aceite de palma crudo	Peso aceite 500 gr. Catalizador 3 % w/w Agitación 300 rpm	Temperatura	330 – 400 °C
Craqueo de aceite de palma refinado	Peso aceite 500 gr. Catalizador 3 % w/w Agitación 300 rpm	Temperatura	330 – 400 °C

Fuente: elaboración propia.

## 7.6. Caracterización de productos obtenidos

En la siguiente tabla se presentan los parámetros que se medirán de cada producto para caracterizarlo indicando la norma ASTM aplicada.

Tabla XI. **Parámetros ASTM**

Variable	Norma ASTM	Valor general manejado
Temperatura de destilación °C 90 % de recuperación	D86	230 338
Min		
Max		
Densidad Kg/Lt	D 1298	0.78-0.85
Índice de cetano	D 976-91	40

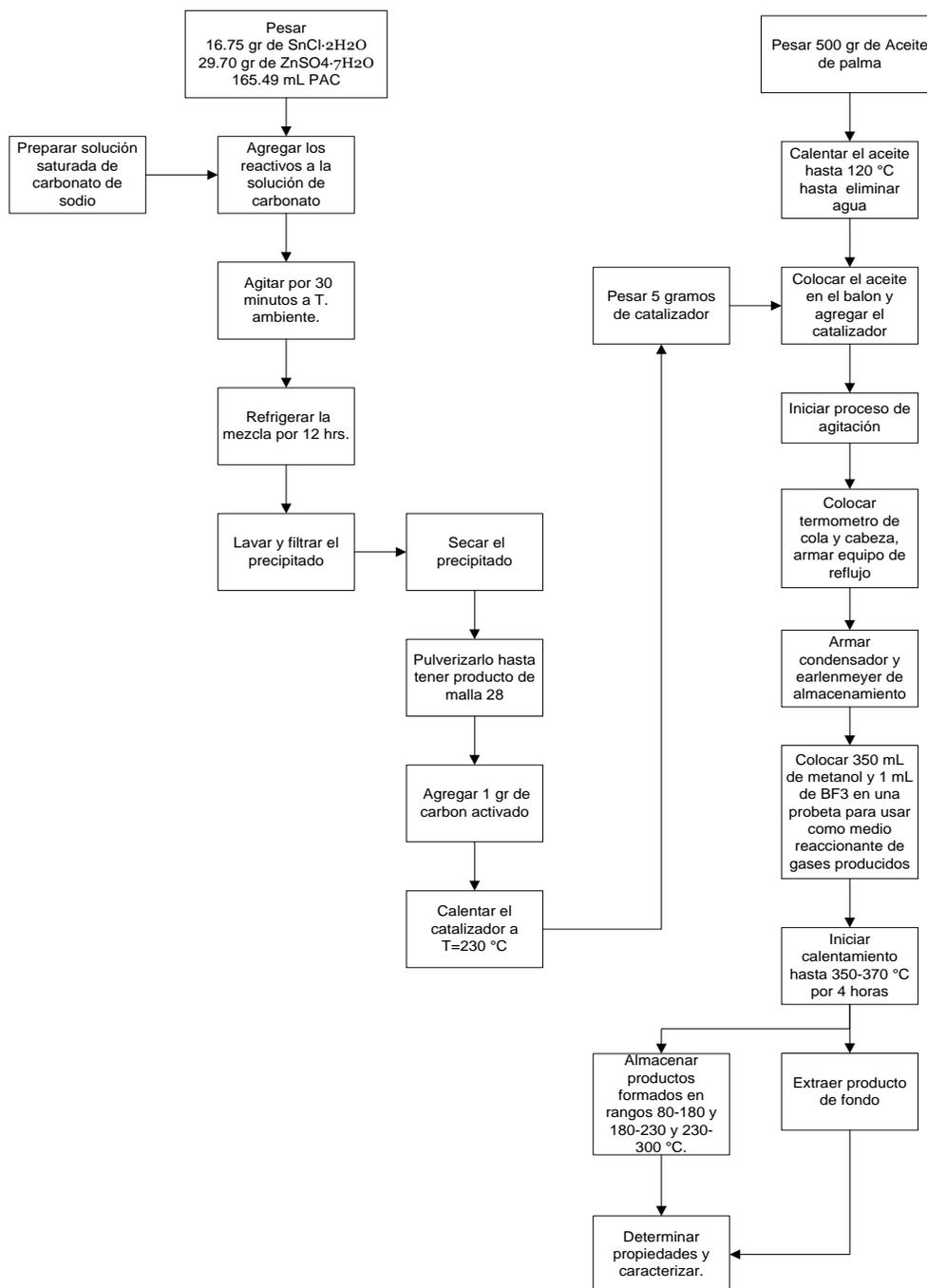
Fuente: American Society for Testing and Materials. *Annual book ASTM standards*, p. 200.

Tabla XII. Diagrama de actividades en la metodología

Recolección de información	Trabajo de laboratorio		Trabajo de Escritorio
<p><b>Documentación impresa</b></p>	<p>Recolección de data: Rendimientos, % de fracciones obtenidas, propiedades físico-químicas de los productos.</p>		<p>Base de datos % en volumen destilados Temperatura de destilación Rendimientos vs. % catalizador, Comparación rendimientos en aceite crudo y refinado.</p>
<p>Lima, Daniela <i>et.al.</i> "Diesel like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils" <b>J.Anal. Appl. Pyrolysis</b> (71):987-996. 2004.</p> <p>Chang, C.C. "Ind. Eng. Chem. (39):1543. 1942 citado por Lima, Daniela <i>et. al</i> <i>Loc. cit.</i></p> <p>Zhenyi, Cheng <i>et. al.</i> "Thermodynamics Calculation of the Pyrolysis of Vegetable Oils" <b>Energy Sources</b> (26):849-856, 2004.</p> <p>Srivastava y Prasad, 2000 citado por Zhenyi, Cheng <i>et. al.</i> <i>Loc. cit.</i></p> <p>Zhao y Jin, 1983. Citado por Zhenyi, Cheng <i>et. al.</i> "Thermodynamics Calculation of the Pyrolysis of Vegetable Oils" <b>Energy Sources</b> (26):849-856,2004.</p> <p>Gusmão, J., Brodzki, D. Djéga-Mariadassou, G., Frety, R. <b>Catalysis Today</b> (5):533, 1989.</p> <p>Suarez, P.A.Z. <i>et al.</i> <b>J. Braz. Chem. Soc.</b>, accepted for publication, 2006.</p>	<p><b>Inventario</b></p>	<p>Cristalería y equipo</p> <p>1 Balón de 3 bocas esmeriladas 24/40 de 1000 mL 3 Termómetros de mercurio ASTM -2-400 °C (incr. 1°) VWR 2 Condensadores Liebig Long. 500 mm junta 24/40 1 Condensador Allihn Long. 500 mm juntas 24/40 1 unión en Y juntas 24/40 1 unión para desgasificar. Juntas 24/40 2 <i>earlenmeyers</i> de 500 mL boca esmerilada 24/40 20 pies de manguera polietileno de ¼" Tapones de hule N. 4 y N.5 oradados y sin oradar. 2 probetas de 500 mL 3 densímetros diferentes escalas entre 0.6-1.4 VWR precision 2 planchas de agitación y 3 Soportes de metal 4 pinzas de 3 dedos. 3 pinzas de 2 brazos circular.</p> <p>Reactivos Cloruro estannoso di hidratado GR Merck Sulfato de Zinc heptahidratado GR Merck Polihidroxicloloruro de aluminio (PAC) al 50% (coagulante para tratamiento de aguas) Comerssa. Trifluoruro de boro eterato. GR Sigma Aldrich Metanol GR Merck</p>	<p>Comparación</p> <p>Productos y rendimientos obtenidos a partir de aceite de palma crudo y refinado.</p> <p>Evaluación estadística de parámetros de confiabilidad de los resultados. Determinación de variación y desviación en los resultados.</p>
<p><b>Documentación Web</b></p>	<p><b>Condiciones operativas</b></p>	<p>T = 330 – 400 °C P= atmosférica (640 mmHg) Cat. 1 a 3 % sobre peso de aceite. Agitación: 300 rpm</p>	<p>Tabla de resultados</p>
<p><a href="http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2005/prov-nmx-f-019-scfi-2005.pdf">http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2005/prov-nmx-f-019-scfi-2005.pdf</a>.</p> <p><a href="http://www.fao.org/docrep/v4700s/v4700s00.htm">http://www.fao.org/docrep/v4700s/v4700s00.htm</a></p>	<p><b>Diseño de equipo utilizado</b></p>		

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Esquema de procedimiento



Fuente: elaboración propia.

## 7.7. Variables

Para este estudio se evaluarán las variables dependientes que se definen a continuación:

$$\% \text{ de conversión} = \frac{\text{Peso de aceite de palma convertido}}{\text{Peso de aceite de palma alimentado}} \times 100 \%$$

$$X_{AP} = \frac{m_{prod}}{m_{AP}} * 100 \% \quad [2]$$

$$\text{Rendimiento de producto} = \frac{\text{Peso de producto}}{\text{Peso de aceite de palma alimentado}} \times 100 \%$$

$$Y_{producto} = \frac{m_{producto}}{m_{AP \text{ alimentado}}} * 100 \% \quad [3]$$

$$\text{Selectividad de producto deseado} = \frac{\text{Peso de producto deseado}}{\text{Peso total de productos}} \times 100 \%$$

$$S_{producto \text{ deseado}} = \frac{m_{producto \text{ deseado}}}{m_{productos}} * 100 \% \quad [4]$$

## 7.8. Recursos materiales disponibles

Se describen a continuación los recursos con se cuenta para la realización de esta investigación, así como un listado del equipo a utilizar.

### 7.8.1. Físicos

Se cuenta con las instalaciones de laboratorio en casa Fernando de Tezanos, con los servicios de agua, energía eléctrica 110 voltios, gas propano, así como también la cristalería y reactivos requeridos, los cuales se detallan más adelante.

### 7.8.2. Equipo y cristalería

A continuación se presenta un listado del equipo y cristalería utilizados para realizar los procedimientos experimentales.

Tabla XIII. Especificaciones del equipo utilizado

Núm.	Equipo	Marca	Precisión
1	Balón de 3 bocas 24/40 1000 mL	VWR	--
2	Termómetros mercurio -10-400 °C	VWR	±1 °C
3	Condesadores Liebig L=500 mm 24/40	VWR	--
4	Condesador Allihn L=500 mm 24/40	VWR	--
5	Unión Y 24/40	VWR	--
6	Unión para vacío 24/40	VWR	--
7	Earlenmeyer de 500 mL 24/40	Pyrex	±5 mL
8	Manguera Polietileno ¼"	--	--
9	Plancha de calentamiento y agitación	Cimarec	--
10	Tapones de hule N.4 y N.5	--	--
11	Densímetros 0.7-1.04	VWR	±0,005
12	Beakers de 500 y 1000 mL	VWR	±5 %
13	Probetas de 100 y 500 mL	VWR	±5%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Materiales y equipos adicionales**

Núm.	Equipo	Marca	Precisión
1	Pipetas serológicas 10 mL	VWR	$\pm 0,1$
2	Soportes de metal	--	--
3	Pinzas de 3 dedos	--	--
4	Pinzas de 2 brazos	--	--
5	Horno hasta 350 °C	Windmare 110	$\pm 5$ °C
6	Papel pH (strips)	Merck	--
7	Papel filtro N.41	Whatman	--
8	Papel aluminio	--	--
9	Agitadores magnéticos de 1"	VWR	--
10	Fibra de vidrio ( <i>kawill</i> )	Refractarios nacionales	--

Fuente: elaboración propia.

En la figura 14 se presenta la forma de arreglo de los equipos utilizados para la experimentación.

Figura 14. **Equipo armado para el experimento**



Fuente: Laboratorio en casa de Fernando de Tezanos.

### 7.8.3. Reactivos

A continuación se presenta una descripción de los reactivos utilizados, en la tabla XV.

Tabla XV. Reactivos para la preparación del catalizador

Reactivo	Marca	Descripción
Cloruro estannoso dihidratado	Merck	Grado reactivo
Sulfato de zinc heptahidratado	Merck	Grado reactivo
Carbonato de sodio	Merck	Grado reactivo
Polihidroxiclорuro de aluminio (PAC)	Comerrsa	Solución al 50 % V/V
Aceite de palma	Crudo	Muestra proporcionada por el asesor
Aceite de palma	Refinado	De cualquiera de las marcas comerciales del mercado
Catalizador		El preparado como se detalla en la sección 10.2
Trifluoruro de boro eterato	Sigma Aldrich	Grado reactivo
Metanol	Merck	Grado reactivo

Fuente: elaboración propia.

## 8. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

### 8.1. Recolección y ordenamiento de la información

Los detalles de la información que se recopilan a partir del experimento son los presentados en la siguiente tabla. Esta información permitirá analizar y comparar los resultados obtenidos tanto del aceite de palma crudo como refinado, y a la vez determinar propiedades de los productos obtenidos.

Tabla XVI. Datos obtenidos de la experimentación

Temperatura °C	Peso de aceite inicial (gr)	% catalizador	Volumen líquido obtenido (mL)	Volumen residuo o fondo (mL)	Volumen agua producido (ml)	Volumen de gas (L)	Velocidad de agitación (RPM)
350							300
360							300
370							300
380							300
390							300

Fuente: elaboración propia.

### 8.2. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Con los datos obtenidos de la experimentación se obtendrán las propiedades de los productos obtenidos y sus características. A continuación se presentan las tablas que se construirán para ordenar y procesar la información obtenida.

Tabla XVII. **Densidad de productos obtenidos según rango de destilación**

	Productos de fracción TBP-190 °C	Productos de fracción 190-320 °C	Productos arriba de 320 °C
Peso (gr)			
Volumen (mL)			
Densidad (Kg/L)			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Curvas de destilación de productos obtenidos**

Volumen (mL) como % de V total	Temperatura fracción TBP-190 °C	Temperatura fracción 190-320 °C
TBP		
5		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
EBP		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Tabla de rendimientos**

Temperatura °C	Fracción TBP-190 °C	Fracción 190-320 °C	Gas	Fondos	% agua	Y <sub>AP</sub>		S <sub>p</sub>		X
						TBP- 190 °C	190- 320 °C	TBP- 190 °C	190- 320 °C	
350										
360										
370										
380										
390										

Fuente: elaboración propia.

### 8.3. Análisis de Información

Los valores de los resultados obtenidos serán comparados con los que se conocen como especificaciones de las fracciones a estudiar. Por lo que a continuación se presentan las propiedades de los combustibles con los que se comparan los valores obtenidos en este estudio.

Tabla XX. **Especificaciones típicas para naftas**

Propiedad	Método ASTM	Especificación
Parafinas, % vol., min.	D 5134	75
Aromáticos, % vol., Max.	D 5134	10
Olefinas, % vol., Max.	D 5134	1
Naftenos	D 5134	Balance
Contenido de Plomo, ppb, Max.	D 5185	250
Contenido de Azufre, ppm, Max.	D 4294	250
RVP a 37.8°C, psi, Max.	D 323	12
Color, saibolt, min.	D 156	+25
Residuo de Evaporación	D 1356	50 mg/100 mL
Densidad específica	D 1298	Mín 0.67
		Max 0.69
Destilación, °C	D 86	IBP, min. 35 °C FBP, Max. 150 °C
Poder Calórico	IS 1448 P:7	Reportar
Razón C:H	D 3343	Reportar

Fuente: American Society for Testing and Materials. *Annual book ASTM standards*. p. 215.

Tabla XXI. **Propiedades del *fuel oil* N.6 (bunker)**

Propiedad	Método ASTM	Especificación
Flash point, °C, min	D 93	60
Agua y sedimento %V, Max	D 95 + D 476	2.00
Viscosidad cinemática @ 100°C, mm <sup>2</sup> /s	D 445	15 50
Min		
Max		
Pour Point °C	D 97	15 max
Low High		

Fuente: American Society for Testing and Materials. *Annual book ASTM standards*. p.220.

Tabla XXII. **Especificaciones para combustible diésel**

Propiedad	Método ASTM	Low Sulfur N. 1-D	N. 1-D	Low Sulfur N. 2-D	N. 2-D	N. 4-D
Flash point, °C, min	D 93	38	38	52	52	55
Agua y sedimento, % vol., Max	D 2709 D 1796	0,05	0,05	0,05	0,05	0,5
Temperatura de destilación, °C, 90 % vol. recuperado	D 86	288	288	282 338	282 338	
Min						
Max						
Viscosidad cinemática, 40°C, cSt	D 445	1,3 2,4	1,3 2,4	1,9 4,1	1,9 4,1	5,5 24,0
Min						
Max						
Ceniza, % peso, Max.	D 482	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Azufre, % peso, Max	D 2622	0,05	0,5	0,05	0,5	2
Corrosión en cobre, 3 hrs a 50°C, Max	D 130	N. 3	N. 3	N. 3	N. 3	
Número de cetano, min	D 613	40	40	40	40	30
Uno de los siguientes:						
Índice de cetano, min	D 976	40		40		
Aromaticidad, % vol., Max	D 1319	35		35		
Residuo carbón ramsbottom en el 10% de residuo de destilación	D 524	0,15	0,15	0,35	0,35	

Fuente: American Society for Testing and Materials. *Annual book ASTM standards*. 2006.

También se construirán gráficas de las curvas de destilación, es decir gráficas de temperatura de destilación contra el porcentaje en volumen de destilado. Con esto se determinará el rendimiento de cada fracción según el corte de temperatura. Estos se complementan con la presentación en forma tabulada de los valores obtenidos de los rendimientos, la selectividad y rendimiento de productos específicos.

#### **8.4. Análisis estadístico de datos**

Para el análisis de los datos obtenidos se hará un análisis de medias para los datos obtenidos, así como la determinación de la desviación estándar de los mismos.

Posteriormente se efectuará un análisis de correlación para determinar si existe una tendencia en los datos obtenidos entre temperatura y rendimientos con la cantidad de catalizador utilizado.

Este tipo de análisis estadístico se elige, ya que el estudio está delimitado a una escala de nivel laboratorio, pues se busca comprender y estudiar los fenómenos que se dan y de esa manera realizar posteriormente estudios más minuciosos de cada una de las variables involucradas en el proceso de craqueo. Es por esta razón que el estudio es del tipo cuantitativo exploratorio experimental.

#### **8.5. Programas a utilizar para análisis de datos**

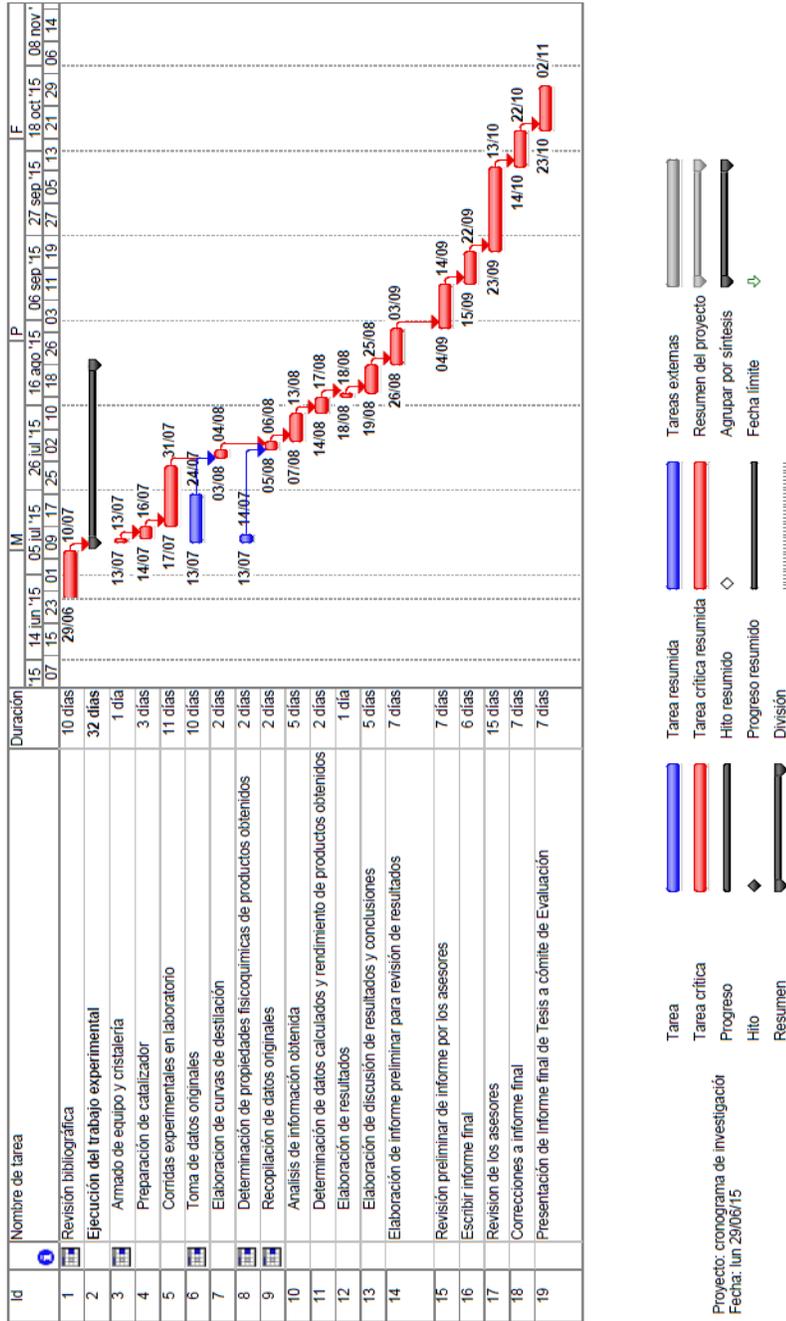
Empleo de una lap top Toshiba Satellite L655 core duo 3 de 64 bits, con ambiente de Windows 10. Los textos se procesaron con Microsoft Word 2010,

y las tablas y gráficos se realizarán con Microsoft Excel 2010. Para el análisis de los datos se utiliza el programa Info Stat.

## **9. CRONOGRAMA**

A continuación se describen las actividades a realizar durante la investigación así como la duración de cada una de éstas.

Figura 15. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project.

## **10. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO Y RECURSOS**

### **10.1. Recursos humanos disponibles**

Dentro del recurso humano disponible se encuentra el experimentador y tesista, Obed Marroquín, para la ejecución de las corridas del experimento y realizar la recolección y ordenamiento, así como el procesamiento de la información adquirida.

Se cuenta con el soporte técnico y científico de Fernando de Tezanos, cuya amplia experiencia en procesos de tratamiento de petróleos y procesos productivos de distinta índole dará la asesoría requerida para efectuar este trabajo de graduación.

En la misma línea de soporte se cuenta con la asesoría del Ing. José Rosal quien aporta su experiencia en el área experimental y de análisis químico, así como su experiencia en los procesos industriales de biocombustibles y biomasa. El costo por la asesoría para la realización de este estudio, es aportado por el experimentador.

### **10.2. Recursos materiales disponibles**

Se cuenta con las instalaciones de laboratorio en casa de Fernando de Tezanos, con los servicios de agua, energía eléctrica 110 voltios, gas propano, así como también la cristalería y reactivos requeridos, que serán aportados por Fernando de Tezanos, para realizar el estudio. A continuación se presentan los

costos de la realización del experimento de craqueo catalítico del aceite de palma.

Tabla XXIII. **Presupuesto para la realización del experimento**

Costos			
Reactivos	Cantidad	Precio	Total
Cloruro estanoso dihidratado GR Merck	25 gr	Q 525,00	Q 525,00
Sulfato de zinc heptahidratado GR Merck	125 gr	Q 250,00	Q 250,00
Aceite de palma refinado	5 gal	Q 32,00	Q 160,00
Aceite de palma crudo	5 gal	Q 17,00	Q 85,00
Polihidroxiclورو de aluminio (PAC) GI 50 %	1 Lt	Q 55,00	Q 55,00
BF3 eterato	1 K	Q 70,00	Q 70,00
Cristalería			
Balones de 3 bocas	1	Q 800,00	Q 800,00
Condensadores rectos	2	Q 400,00	Q 800,00
Condensadores de reflujo	1	Q 500,00	Q 500,00
Termómetros 0-400 °C	3	Q 160,00	Q 480,00
manguera de 1/4" (pies)	15	Q 5,00	Q 75,00
Tapones de hule N.4, 5	10	Q 25,00	Q 250,00
Beackers de boca esmerilada	2	Q 250,00	Q 500,00
Conector en Y	1	Q 750,00	Q 750,00
Conector para gas	1	Q 250,00	Q 250,00
Probetas de 100 mL	3	Q 25,00	Q 75,00
Probetas de 1000 mL	1	Q 200,00	Q 200,00
Probetas de 500 mL	2	Q 150,00	Q 300,00
Densímetros	3	Q 200,00	Q 600,00
Servicios			
Gas propano	1	Q 186,00	Q 186,00
Energía eléctrica	1	Q 350,00	Q 350,00
Agua	1	Q 150,00	Q 150,00
Servicios por asesoría de tesis	1	Q 2,500,00	Q 2,500,00
<b>Total</b>		<b>Q 9.911,00</b>	

Fuente: elaboración propia.

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADJAYE, J.D. y Bakhshi, N.N.(1995). Production of Hydrocarbons by Catalytic Upgrading of a fast Pyrolysis Bio-Oil Part I: Conversion over various catalyst. *Fuel Processing Technology*, (45), 161-183.
2. ADJAYE et al. (1996). *Fuel Processing Technology*, (48), 115-143.
3. ANI, F.N. y Salam, B. (1995). *Upgrading of Palm Oil by Catalytic cracking Proceedings*. 6th ASEAN Conference on Energy Tech. Bangkok Thailand, 160-167.
4. BECK J.C. et.al.(1992) *US Patent 5.108.725*
5. CHANG, C.C. *Ind. Eng. Chem.* (39):1543. 1942 citado por Lima, Daniela et. al. Loc. cit.
6. CORMA, A. et. Al. (1991). Influence of Superacid Sites in Ultrastable Y Zedites on Gas Oil Cracking concepts in Catalyst design. *American Chemistry Society*. 12-25.
7. CSIESERY, S.M. (1995). *The future of Shape Selective Catalysis by Microporous Materials*, (94):1-12. Editado por H.K. Beger, H.G. Korge.
8. DE FILIPPIS et.al. (1983) *Proc. Vegetable Oil Diesel Fuel, Seminar III, Agric. Rev. Manuals*. (Publ. By U.S. Dept. Agric. Res. Serv).

9. GERTZ, C. 1988. *Untersuchung und lebensmittelrechtliche Beurteilung von raffinierten und nicht raffinierten pflanzlichen Speiseölen und Fetten. Fat Science Technology*, 90: 45-50.
10. GUSMAO, J., Brodzki, D. Djéga-Mariadassou, G., Frety, R. (1989). *Catalysis Today* (5),533.
11. HART, H. (1987). *Organic Chemistry: A Short Course*. 7th ed. USA: Houghton Mifflin Company.
12. I.C.P. Fortes, P.J. Baugh. (1994), *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, (29),153.
13. I.C.P. Fortes, P.J. Baugh. (1999). *J. Braz. Chem. Soc.* (10), 469.
14. IDEM, R.O., S.P.R. Katikaneni, N.N. Bakhshi. (1997). Catalytic conversion of canola oil to fuels and chemicals: role of catalyst acidity, basicity and shape selectivity on product distribution. *Process Tech.*, (51), 101-125.
15. IDEM, R.O., S.P.R. Katikaneni, N.N. Bakhshi, (1996). *Energy Fuels* (10), 1150.
16. J.W. Alencar, P.B. Alves, A.A. Craveiro, (1983 ). *J. Agr. Food Chem.* (31) 1268.

17. KATIKANENI, S.P.R., J.D. Adjaye, R.O. Idem and N.N. Bakshi. (1996). Catalytic conversion of canola oil over potassium-impregnated HZSM-5 catalysts: C2-C4 olefin production and model reaction studies. *Ind. Eng. Chem. Res.* (35), 3332-3338.
18. KATIKANEMI S.P.R. et. Al. (1998). *J. Am. Oil Chem. Soc.* (75), 381-391.
19. KRESGE, C.T. et.al. (1992). *Nature* (359), 710.
20. LIMA, Daniela et.al.(2004). Diesel like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils. *J.Anal. Appl. Pyrolysis* (71),987-996.
21. McMURRY, J. (2008), *Química Orgánica*, 7a Ed. México., Ed. Cengage Learning, p. 1061.
22. Ministerio de Energía y Minas Guatemala, (2015), *Informe Estadístico 2015*. Guatemala, 12.
23. MORRISON, R.T. y Boyd, R.N., (1998). *Química orgánica*, 5a. Ed., México, Ed. Addison Wesley Longman de México, S.A. de C.V. p. 856.
24. ORGANIZACIÓN de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1997). *Grasas y aceites en la nutrición humana*. (57) Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/v4700s/v4700s00.htm>. [Consulta:octubre 2015].

25. OTTO, R.B. (1945). "Gasolina derivada dos oleos vegetals" *Bol. Divulgacao Inst. Oleos* 3 (91).
26. PRASAD Y.S., Bakhshi N.N. Can. (1986). *J. Chem. Eng.* (64), 278-284.
27. SCHWAB, A.W., G.J. Dykstra, E. Selke, S.C. Sorenson, E.H. Pryde, J. Am. (1988). *Oil Chemical Society*. 65, 1781.
28. SECRETARIA de Economía de México [en línea] *Normas*. Recuperado de: <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2005/proy-nmx-f-019-scfi-2005.pdf>.
29. SEGERS, J.C. and van de Sande, R. 1988. Degumming theory and practice. *Proceedings AOCS World Conference on Edible Fats and Oils Processing*. Maastricht pp 88-83.
30. SHARMA, R. K., Bakhshi N.N. Can. (1991). *J. Chem. Eng.* 3 (69), 1071-1081.
31. SHISHIDO, T. y Hattori H. (1996). Hydrogen effect on Cumene Cracking over Zirconium Oxide promoted by sulfate Ion and Platinum. *Journal of Catalyst*. (161), 194-197.
32. SITI Kartina Binti Abdul Karim, (2006, abril). Effect of temperature and hydrogen on palm oil cracking over mcm-41/zsm-5 composite catalysts. *Tesis Master of Engineering (Chemical) Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering Universiti Teknologi Malaysia*. p. 8-20.

33. SRIVASTAVA y Prasad, (2000) citado por Zhenyi, Cheng et. al. Loc. cit.
34. S.R.R. da Costa, F.R. Santos, J.C.N. Ferreira, (1998) *QUÍMICA NOVA* (21), 560.
35. SUAREZ, P.A.Z. et al. (2006). *J. Braz. Chem. Soc.* accepted for publication.
36. TAN, Y.L. et.al. (1999). Catalytic Conversion of Palm Oil to fuels and Chemicals. *Canadian Journal of Chem Eng.* (77), 153-162.
37. THOMAS, A. 1982. Über die Entfernung von Schadstoffen bei der Dämpfung von Speiseölen und fetten (Removal of pollutants during the steam treatment of oils and fats). *Fette Seifen Anstrichmittel*: 84: 133-136.
38. TWAIQ, F. et. Al. (1999). *Ind. Eng. Chem. Res.* (38), 3230-3238.
39. WALDYR Luiz Ribeiro Gallo, Waldyr Luiz. (2007, agosto). *Perspectivas para el biodiésel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras. CEPAL. Distr. LIMITADA LC/MEX/L.791 Original: español*, p.194-199.
40. ZHAO y Jin, (1983). Citado por Zhenyi, Cheng et. al. (2004) Thermodynamics calculation of the pyrolysis of vegetable oils. *Energy Sources* (26), 849-856,2004.

41. ZHENYI, Cheng et. al. (2004). Thermodynamics Calculation of the Pyrolysis

