

# Universidad Autónoma De Baja California Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



## “EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN MOTOR DIESEL, UTILIZANDO MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ingeniería

**PRESENTA**

Armando Pérez Sánchez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dra. Gisela Montero Alpírez

**CODIRECTOR DE TESIS**

Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez



## **DEDICATORIA:**

A mi esposa Angélica Zúñiga López: Por todo tu apoyo, cariño y por ayudarme a conseguir un logro más.

A mis padres por brindarme la oportunidad de haber estudiado.

A mis queridas hermanas.

A todos los compañeros que me ayudaron durante este tiempo.

A las personas queridas que ya no están a con nosotros para escuchar sus sabios consejos, Abuela: Aurora Vaca Madrigal.



## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo financiero a través de la beca de estudios que me fue otorgada durante el periodo del posgrado.

A la UABC, al Instituto de Ingeniería, y en especial a Dr. Benjamín Valdez Salas por todas las oportunidades que me brindaron y que me permitieron realizar una estancia de investigación en la Universidad de Antioquia, ubicada en Medellín, Colombia.

A los sinodales: Dr. Alejandro Lambert, Dra. Margarita Stoytcheva, Dr. Rogelio Ramos Irigoyen, por revisar la presente tesis y sus contribuciones.

A mi familia: mis padres, Jesús Pérez Pérez y Aurora Sánchez Madrigal, por su incondicional apoyo en todos los aspectos, mis hermanas, Yesenia Pérez Sánchez, Elhiza Aurora Pérez Sánchez, Stefani Pérez Sánchez, Paula Gabriela Pérez Sánchez, Valeria Jazmin Vaca Madrigal.

A la familia Bio Jiménez por el apoyo brindado.

También muestro mi más sincero agradecimiento hacia todos mis compañeros del grupo de biocombustibles, a Conrado García, Ana Vázquez, Marcos Coronado, Lydia Toscano, Ramón Ayala, Laura Pérez, Iliana Aguilar, Daniela Montes, Edgar Valenzuela y Enaym Nava por toda la ayuda que me otorgaron, pero lo más importante su amistad.

Por último deseo hacer una mención y distinción especial a las personas que jugaron un papel fundamental en el desarrollo de este trabajo, y que gracias a ellos tuve un gran aprendizaje, mis directores de tesis, la Dra. Gisela Montero Alpírez y el Dr. Héctor E. Campbell. personas de gran calidad humana, que siempre se dieron el tiempo de atenderme, resolver mis dudas con mucha paciencia y que mostraron una buena disposición ante todo.

Gracias por todo el apoyo que me brindaron.



## CONTENIDO

|  |      |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS   | vi   |
| LISTA DE TABLAS  | viii |
| RESUMEN  | ix   |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN   | 1    |
| 1.1 Planteamiento del problema   | 1    |
| 1.2 Justificación  | 3    |
| 1.3 Objetivos  | 4    |
| 1.3.1 Objetivo general   | 4    |
| 1.3.2 Objetivos específicos  | 4    |
| 1.4 Hipótesis  | 5    |
| 1.5 Antecedentes   | 5    |
| 1.5.1 Funcionamiento adiabático del ciclo diesel                       | 5    |
| 1.5.2 La historia de los combustibles vegetales en motores diesel      | 7    |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO  | 10   |
| 2.1 Biodiesel  | 10   |
| 2.2 Especificaciones del biodiesel                                     | 12   |
| CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS                                       | 13   |
| 3.1 Simulación de la etapa de combustión un ciclo diesel               | 13   |
| 3.1.1 Modelo de simulación   | 13   |
| 3.1.2 Composición de combustibles                                      | 17   |
| 3.1.3 Método termodinámico   | 17   |
| 3.1.4 Reacciones químicas  | 18   |
| 3.1.5 Resultados   | 18   |
| 3.2 Pruebas y adaptación de prototipo                                  | 21   |
| 3.2.1 Evaluación del motor, empaques, piezas y sistema de alimentación | 21   |
| 3.2.2 Caracterización del motor diesel de combustión interna           | 25   |
| 3.2.3 Adquisición de datos   | 25   |
| 3.2.4 Puesta en marcha de motor 1 prototipo                            | 26   |
| 3.2.5 Mantenimiento en general, y puesta en marcha del motor 2         | 27   |



|   |    |
|---|----|
| 3.3 Obtención de biodiesel y pruebas de calidad   | 30 |
| 3.3.1 Determinación de la cantidad de aceite contenido en la semilla de higuera                       | 30 |
| 3.3.2 Transesterificación de aceite de jatropha curcas  | 36 |
| 3.3.3 Cromatografía de gases aplicada al biodiesel de jatropha  | 40 |
| 3.3.4 Prueba de estabilidad oxidativa   | 41 |
| 3.3.5 Prueba del Índice de acidez del biodiesel   | 43 |
| 3.4 Evaluación de la operación de un motor diesel utilizando B20                                      | 44 |
| 3.4.1 Prueba en motor Hatz, trabajando con régimen específicos y medición de potencia, emisiones, rpm | 44 |
| 3.4.2 Programa de control y adquisición de datos  | 48 |
| 3.4.3 Equipos para medir emisiones  | 48 |
| CAPÍTULO 4. Conclusiones y recomendaciones  | 53 |
| CAPÍTULO 5. Referencias   | 57 |
| CAPÍTULO 6. ANEXOS  | 59 |
| 6.1 Producción académica y participación en eventos   | 59 |



## Listado de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Estructura de un triglicérido.   | 10 |
| Figura 2.2 Estructura de un ácido graso.  | 11 |
| Figura 2.3 Reacción de transesterificación.   | 11 |
| Figura 3.1 Imagen térmica tomada en la salida de los gases de combustión del block del Motor.       | 14 |
| Figura 3.2 Resultados de temperatura de la imagen termográfica.                                     | 14 |
| Figura 3.3 Diagrama de proceso.   | 15 |
| Figura 3.4 Poder calorífico de los combustibles.  | 20 |
| Figura 3.5 Manguera del sistema de alimentación deformada.  | 22 |
| Figura 3.6 Deformación del empaque de la bomba de alta presión.                                     | 22 |
| Figura 3.7 Empaque del motor deformado.   | 23 |
| Figuras 3.8 Muestras de mangueras expuestas a temperaturas 25 °C y 75°C.                            | 23 |
| Figura 3.9 Equipo de pruebas universal electromecánico MTS modelo Insight 100 extended length.      | 24 |
| Figura 3.10 Instalación de termopares y sistema de adquisición de datos.                            | 25 |
| Figura 3.11 Motor diesel, Mercedes-Benz V8.   | 26 |
| Figuras 3.12 Motor diesel Kubota D600–B, Condiciones iniciales.                                     | 28 |
| Figuras 3.13 Motor diesel Kubota D600–B, condiciones finales.                                       | 28 |
| Figura 3.14 Fabricación de estructura.  | 29 |
| Figura 3.15 Prensa utilizada para la extracción de aceite de semillas.                              | 30 |
| Figuras 3.16 Caracterización de semillas regular y modificada.                                      | 32 |
| Figura 3.17 Sistema de extracción Soxhlet, montado en los laboratorios del Tecnológico de Mexicali. | 33 |
| Figura 3.18 Reactor utilizado para hacer biodiesel.   | 36 |
| Figura 3.19 Reacción de transesterificación.  | 37 |
| Figura 3.20 Muestra de metanol con biodiesel extraído del reactor.                                  | 38 |
| Figura 3.21 Modificaciones al reactor, para mejorar la utilización.                                 | 39 |
| Figura 3.22 Lavado del biodiesel, con agua caliente.  | 40 |
| Figura 3.23 Cromatografía de biodiesel de jatropha.   | 40 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 3.24 Estabilidad oxidativa del biodiesel de higuera y palma africana.   | 42 |
| Figura 3.25 Resultado de prueba de índice de acidez del biodiesel de jatropha. | 43 |
| Figura 3.26 Medidor gravimétrico de flujo de combustible.                      | 46 |
| Figura 3.27 Medidor de flujo de aire Thermal TA2                               | 46 |
| Figura 3.28 Medidor portátil de NO <sub>x</sub> EXA 240CL                      | 48 |
| Figura 3.29 Medidor AVL Dicom 400  | 49 |
| Figura 3.30 Medidor de THC por ionización de llama.                            | 50 |



## Listado de tablas

### Listado de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1 Especificación del biodiesel  | 12 |
| Tabla 3.1 Descripciones técnicas del motor tomado como referencia                     | 13 |
| Tabla 3.2 Condiciones de alimentación de la simulación                                | 16 |
| Tabla 3.3 Composición de metil ésteres de biodiesel de higuera                        | 17 |
| Tabla 3.4 Reacciones químicas del proceso de combustión de metil ésteres y diesel     | 18 |
| Tabla 3.5 Poder calorífico inferior de metil ésteres derivados del aceite de higuera. | 19 |
| Tabla 3.6 Emisiones de diesel, biodiesel y mezclas.                                   | 21 |
| Tabla 3.7 Especificaciones del motor Kubota D600-B                                    | 27 |
| Tabla 3.8 Consumo de combustible del motor.   | 29 |
| Tabla 3.9 Peso en % de la semilla de higuera.   | 31 |
| Tabla 3.10 Diseño de experimentos para extracción de aceite de higuera.               | 34 |
| Tabla 3.11 Resultados de pruebas de extracción de aceite.                             | 35 |
| Tabla 3.12 Composición de los metil éster que conforman el biodiesel de jatropha.     | 41 |
| Tabla 3.13 Características del motor diesel Hatz.                                     | 44 |
| Tabla 3.14 Motor Hatz, trabajando a régimen constante.                                | 45 |
| Tabla 3.15 Características del medidor de flujo de aire.                              | 47 |
| Tabla 3.16 Características técnicas del medidor de NOx.                               | 49 |
| Tabla 3.17 Características técnicas del AVL Dicom 400.                                | 50 |
| Tabla 3.18 Características del medidor de THC por ionización de llama.                | 51 |
| Tabla 3.19 Resultado de corridas del motor Hatz.                                      | 52 |



## RESUMEN

El trabajo desarrollado en la presente tesis, considera los diversos aspectos del biodiesel, como combustible en los motores de ignición por compresión, así como la simulación del proceso de combustión, donde se utilizó el Software Aspen®, herramienta que permitió simular una etapa del motor de combustión por compresión trabajando con mezclas diesel-biodiesel, bajo diversas condiciones de operación.

El impacto de los materiales que se encuentran en contacto con el biodiesel fue otro aspecto considerado en el presente trabajo, del cual se desprenden datos interesantes como la degradación de elastómeros, empaques de motor y corrosión en metales. Por ello, fue necesario considerar los aspectos y retos técnicos así como de compatibilidad con materiales del motor con los que está en contacto con el combustible.

Una de las ventajas más importantes que tiene el biodiesel, es el beneficio ambiental, ya que su utilización representa una oportunidad para contribuir en la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Ello ayuda al mejoramiento de la calidad de aire y salud pública en cuanto a enfermedades crónicas respiratorias se refiere.

Por otro lado otro de los aspectos más relevantes en cuanto al uso del biodiesel es la variación porcentual del poder calorífico para las mezclas restantes con respecto al diesel, esto es, B50, B20, B10 y B5 fueron de 6.42%, 2.57%, 1.27% y 0.54% respectivamente.

La disminución del poder calorífico tanto del biodiesel como sus mezclas, representa una desventaja importante comparado con el diesel, puesto que implica repercusiones directas que se reflejarían en un descenso de la potencia del motor, así como un incremento en el consumo de combustible, tratando de obtener la misma potencia se incrementa el consumo de combustible.

Palabras clave: Biodiesel, simulación, poder calorífico, emisiones, potencia.



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

El consumo irracional de fuentes de energía, principalmente combustibles fósiles: carbón, gas natural y petróleo sigue una tendencia en aumento; este consumo agrava el calentamiento global, principal desafío medioambiental que hoy afronta la humanidad a nivel mundial. Los Gases de Efecto Invernadero (GEI), entre los que se encuentra el dióxido de carbono, son los responsables del fenómeno denominado "Calentamiento Global", el cual ocurre debido al uso irracional de combustibles fósiles (petróleo y carbón). Una de las opciones es la utilización de combustibles alternativos que sean capaces de reducir la concentración de tales gases, un ejemplo es la utilización del biodiesel como sustituto del diesel.

Los recursos no renovables, como el petróleo, tienden a disminuir con el paso del tiempo debido a que la mayoría de nuestra maquinaria está diseñada para trabajar con combustibles derivados de este recurso. Estudios recientes indican que las reservas mundiales de petróleo, siguen disminuyendo. Teniendo en cuenta estos estudios, surge como una opción en la utilización de fuentes renovables de energía, como la biomasa, específicamente el procesamiento del biodiesel a partir de algunas plantas oleaginosas, como la higuera (Ricinus Communis) y Jatropha Curcas. Otras fuentes de materia prima para convertirlas en biodiesel, son el aceite vegetal usado, proveniente de los establecimientos de preparación de alimentos, y las grasas animales (Coronado et al., 2009).

Desde hace 20 años y en forma creciente, se ha implementado la utilización de biodiesel como fuente renovable en sustitución de diesel, aplicado a motores abastecidos con dicho combustible, en países del primer mundo. Por ello, surge la necesidad de realizar investigaciones sobre la evaluación de motores de combustión interna (base diesel), operándolos con mezclas de diesel-biodiesel. Para comparar el rendimiento y la eficiencia que nos ofrece su utilización, así como evaluar las



reacciones químicas en las piezas, empaques, y sistema de alimentación que están en contacto directo e indirecto con las mezclas de biodiesel-diesel.

Con la finalidad de establecer los parámetros de operación de la cámara de combustión, se utilizó el software Aspen®, herramienta que permitió simular procesos de combustión de un ciclo diesel, considerando las condiciones de operación de un motor diesel de 3 pistones, así como la utilización de diferentes mezclas diesel-biodiesel.

Asimismo, se desarrolló la evaluación y caracterización de un motor diesel modelo D600-B de 3 pistones, alimentado con combustible convencional (diesel), para comparar su funcionamiento con mezclas diesel- biodiesel. Como resultado de esta investigación se midieron emisiones, eficiencia, y el consumo de combustible. Además, se realizaron pruebas cualitativas con las mangueras del sistema de alimentación de combustible, y se le aplicó carga al motor, para observar el efecto en la potencia.

Uno de los objetivos desarrollados en esta investigación consistió en identificar el porcentaje de mezcla diesel-biodiesel, que ofrece la mayor eficiencia en cuanto a la relación consumo-rendimiento, y que genere las menores emisiones de gases CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>. Asimismo, que provoque la menor alteración química en piezas, empaques y sistema de alimentación, así como un mayor beneficio al motor prolongando su vida útil.

Se pretende que, los resultados de esta investigación sirvan de base para obtener información confiable y segura, de la utilización del biodiesel en motores de combustión interna (base diesel), en zonas geográficas con condiciones atmosféricas similares a las de Mexicali, B.C. Así como abordar las problemáticas y limitaciones que se pudieran presentar para la evaluación, caracterización y comparación del rendimiento de un motor diesel utilizando mezclas diesel-biodiesel.



## 1.2 Justificación

La tendencia mundial hacia el uso de los biocombustibles como sustituto de los combustibles convencionales para la mitigación de emisiones, nos lleva a la búsqueda de nuevas fuentes renovables de energía sin afectar el uso de tierras disponibles para cultivos alimenticios. Es así como los aceites y grasas residuales constituyen una alternativa viable y sustentable, con potencial energético para su transformación en biodiesel así como la implementación de energía renovable en Mexicali B.C.

La ciudad de Mexicali, B.C., de acuerdo con el reporte del Instituto Nacional de Ecología 2007, ocupa el primer lugar en emisiones de CO y PM10, y sexto lugar en Ozono per cápita a nivel nacional (Zuk et al., 2007), rebasando los límites permisibles por la normatividad ambiental. Por ello, se propone el uso del biodiesel con lo cual se reducirán las emisiones de CO, al utilizar mezclas diesel-biodiesel como combustible en sustitución del diesel, y en consecuencia, se mejorará la calidad del aire en la ciudad, teniendo un alto impacto en la calidad de vida.

Algunos de los modelos de vehículos con motores diesel, más recientes cuentan con las características para soportar mezclas de biodiesel-diesel o B100, ofreciendo las ventajas de la implementación del biocombustible sin afectar el rendimiento del motor. En tales motores, es posible determinar las condiciones de operación, y lograr la meta de reducción de emisiones utilizando mezclas de o B100, esto representa una gran ventaja ya que se utilizaría el mismo equipo con que actualmente se cuenta.



## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Acondicionar y caracterizar un motor utilizando combustible diesel con diversas mezclas diesel-biodiesel. Para evaluar las alteraciones que pudieran tener las partes del motor que se encuentran en contacto con el combustible, por la operación con biocombustibles, así como identificar el porcentaje de mezcla diesel-biodiesel, que ofrece la mayor eficiencia en cuanto a la relación consumo-rendimiento, y que genere las menores emisiones de gases CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Determinar el estado del arte de las condiciones de utilización de mezclas diesel-biodiesel, en motores de encendido por compresión.
2. Simular la combustión de mezclas diesel-biodiesel en un ciclo de combustión por compresión
3. Diseñar, construir e instrumentar, un banco de pruebas para un motor.
4. Extraer aceite a partir de semilla de higuera.
5. Evaluar cualitativamente, el material afectado por la utilización del biodiesel.
6. Medir emisiones, potencia, RPM, flujo de aire en el múltiple de admisión, consumo de combustible, temperatura y presión en la cámara de combustión.
7. Elaborar biodiesel de aceite de semilla de jatropha.
8. Efectuar pruebas de cromatografía de gases de biodiesel.



## **1.4 Hipótesis**

Los motores de combustión por compresión trabajan adecuadamente operando con mezclas diesel-biodiesel, sin embargo, debido a que el biodiesel tiene un poder calorífico menor al del diesel (aproximadamente 12%) desarrollan menor potencia, por lo que se obtendrá un mayor consumo. Por otra parte, en general se tendrán reducciones de emisiones al utilizar mezclas diesel-biodiesel, debido a que la estructura molecular del biodiesel, tiene más oxígeno; además esto dependerá de la eficiencia del motor, materia prima del biocombustible y calidad del mismo.

## **1.5 Antecedentes**

El motor diesel fue considerado por muchos como un motor térmico con un rendimiento elevado y menos contaminante. Ideado por Rudolf Diesel, de quién tomó el nombre genérico, este tipo de motor fue diseñado originalmente para trabajar con carbón pulverizado. El 28 de febrero de 1892, Rudolf Diesel obtuvo la primera patente del motor que le hizo famoso. De hecho, este se diferencia de los de gasolina en un pequeño detalle: no precisa chispa para iniciar la combustión. Diesel, en su búsqueda de un motor de alto rendimiento, tuvo en cuenta que según los principios termodinámicos del físico N.L Sadi Carnot, uno de los padres de la termodinámica, existía la posibilidad de que una mezcla de aire y combustible pudiera explotar si simplemente se comprimía lo suficiente.

### **1.5.1 Funcionamiento adiabático del ciclo diesel**

Proceso adiabático es un término utilizado en termodinámica para describir un sistema cerrado donde no entra ni sale calor del sistema. Se puede considerar como un sistema cerrado en el cilindro del motor, el diesel y el aire se calientan adiabáticamente, por medio del cambio rápido de la presión que causa el pistón, ubicado en el interior del cilindro. Como la presión y la temperatura están relacionadas directamente, si la presión aumenta, también lo hace la temperatura. El calor generado por la compresión



de la carga, es lo que se utiliza para encender la mezcla en el cilindro, en lugar de una chispa en un motor de encendido por chispa.

Durante años, los motores Diesel tuvieron aplicaciones limitadas a causa de dificultades prácticas. Eran pesados, ruidosos y producían grandes vibraciones. Además, su potencia era muy inferior a la de los motores de gasolina de cilindrada similar. Solo la llegada de nuevas tecnologías, como el turbocompresor o la inyección directa, permitió que se popularizaran entre los usuarios.

Diesel ideó un motor de cuatro tiempos y de elevada compresión, capaz de funcionar con diversos tipos de combustibles pesados, tanto líquidos como sólidos. La primera tentativa, auspiciada por la firma Man, fue un fracaso. El motor simplemente explotó, Diesel necesitó tres años más para poner a punto el primer motor práctico de este tipo. Fue en Munich en 1898, seis años después de registrar su patente, cuando presentó su primer motor práctico, un motor de cuatro tiempos, monocilíndrico, refrigerado por agua. Un cervecero norteamericano, Adolphus Busch, adquirió la patente para Estados Unidos y muy pronto un motor bicilíndrico comenzó a producir electricidad para sus fábricas. Diesel se dio cuenta de que los motores de gasolina ofrecían un rendimiento muy pobre debido a su baja relación de compresión; en aquellos tiempos, ésta era de apenas 6:1 (es decir, la mezcla se comprimía 6 veces), para evitar la detonación (explosión incontrolada) de la misma. Con tales antecedentes, Diesel diseñó sus motores de modo tal que, debían funcionar con relaciones de compresión de 20:1 e incluso superiores para evitar tales problemas.

La violencia de la explosión, así como la necesidad de una gran cantidad de aire para funcionar, fueron los puntos débiles iniciales. Peso, volumen, ruido y vibraciones hicieron que los primeros motores diesel sólo se utilizaran en instalaciones estáticas, es decir, para generar electricidad o mover máquinas. En 1903, el Vandal fue el primer barco propulsado por motores diesel y, hacia 1912, este sistema se había popularizado. En 1910, H. Saurer presentó el primer motor Diesel para la automoción, aunque todavía fueron necesarios varios años para que el sistema se hiciera realidad.



En 1923, Daimler Benz presentó un motor Diesel de 40 CV, que fue instalado en el camión 5K3. Se trataba de un motor, en aquel entonces, liviano y rápido, ya giraba a 1000 rpm, con cuatro cilindros. Para evitar los problemas prácticos, la mezcla de aire y diesel no se inyectaba directamente en el cilindro, sino en una precámara. El primer motor diesel para un vehículo ligero, un Mercedes, llegó hasta 1934 (Knothe et al., 2005).

El motor diesel estaba diseñado para funcionar con numerosos combustibles, sin embargo, pronto quedó muy claro que el diesel era el idóneo. Aunque líquido, se trata de un combustible pesado, y por lo tanto, casi imposible de vaporizar. Para conseguir la mezcla, debe introducirse muy pulverizado en el cilindro. Ello fue posible gracias a la invención de los sistemas de inyección.

Para conseguir motores más pequeños, los ingenieros recurrieron a introducir aire a presión en los cilindros, primero mediante la adopción de compresores volumétricos y más adelante de turbocompresores. Además, la inyección de precámara fue sustituida a finales de los años noventa y principios de 2000 por la inyección directa. Este paso había sido dado en los camiones hacía algún tiempo; sin embargo, en 1990, aún no se habían conseguido inyectores tan rápidos y con la elevada presión necesaria para los motores de turismo, que giraban entre 4000 y 4500 rpm, un régimen que duplicaba con creces el de un motor de camión.

### **1.5.2 La historia de los combustibles vegetales en motores diesel**

Por muchos es conocido que los aceites vegetales y grasas animales así como el gasóleo fueron investigados mucho antes de que la crisis energética, de la década de 1970 y principios de 1980, provocara un renovado interés en los combustibles alternativos. También se sabe que Rudolf Diesel (1858-1913), tenía un cierto interés en estos combustibles. Sin embargo, la historia temprana de los combustibles diesel vegetales a base de aceites se suele presentar de forma inconsistente, y hechos que



no son compatibles con las propias declaraciones de Diesel se encuentran con frecuencia.

Es necesario mencionar que ya en el año 1900 los aceites vegetales se utilizaron con éxito en un motor diesel. Durante la Exposición de París en 1900, un pequeño motor diesel fue operado con aceite de cacahuate, por la Compañía Francesa de Otto. El motor fue construido para utilizar combustible derivado del petróleo y se utiliza para el aceite vegetal sin ningún cambio (Van Gerpen et al., 2005).

En la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, se estudió la combustión de biodiesel de aceites vegetales usados y sus mezclas al 30 y 70%, con diesel convencional, en un motor de encendido por compresión, de inyección directa turboalimentado, y se encontró poca diferencia en la forma de tasa de liberación de calor y de los parámetros de combustión para los combustibles estudiados. (Agudelo, 2004).

Además, este resultado concuerda con lo reportado por (Hamasaki et al., 2001), quienes también estudiaron un éster metílico de aceites usados.

La similitud en el proceso de combustión se traduce en que el rendimiento térmico no se modifica al usar los biocombustibles (Schmidt y Van Gerpen 1996, Agudelo 2004), por lo que la diferencia en poder calorífico de los biocombustibles y sus mezclas con diesel se refleja en un aumento del consumo específico de combustible (Canakci y Van Gerpen, 2001).

A continuación se presentan las ventajas más relevantes del uso del biodiesel, en comparación con el diesel (Ching y Shaw, 2008):

- Proviene de un recurso renovable, reduciendo así la dependencia del petróleo y la preservación.
- Es biodegradable.



- Las emisiones generadas como producto de su combustión son menores en comparación a las del diesel.
- Tiene un punto de inflamación superior, dando lugar a una manipulación más segura, facilitando su almacenamiento.
- Cuenta con mejores propiedades lubricantes, ya que el diesel se complementa con aditivos para obtener diesel de bajo contenido de azufre, que reducen considerablemente la lubricidad y la adición de biodiesel en niveles bajos (1-2%) restaura tal lubricidad.



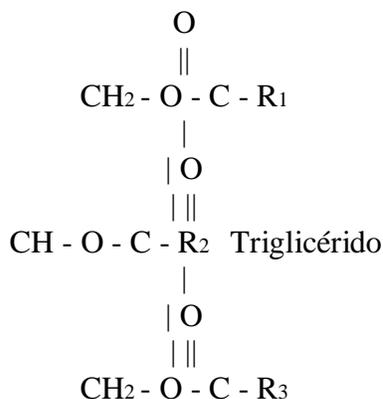
## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Biodiesel

No existe una definición común acerca de biodiesel, el cual se basa en aceites vegetales o grasas animales y sus respectivos ésteres metílicos. Pero la ATSM (American Society Testing and Materials) describe al biodiesel como éster mono alquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, por ejemplo aceites vegetales o grasas animales para utilizarlos en motores Diesel (ASTM, 2008).

Las materias primas para obtener biodiesel, son los aceites vegetales y las grasas animales. Estos compuestos son insolubles en agua pero solubles en la mayor parte de los solventes orgánicos. Tienen densidades menores al agua, y presentan consistencias a temperatura ambiente, ya sean sólidas, semisólidas o líquidas. Cuando se encuentran a temperatura ambiente y están en estado sólido, se les denota como grasas, y cuando se presentan en estado líquido son llamados aceites, esto sucede en la mayoría de los compuestos oleicos (Strayer *et al.*, 2006).

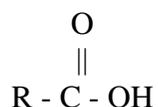
Todos los ácidos vegetales y grasas animales, consisten principalmente, de moléculas de triglicéridos tales como la que se muestran de manera esquemática en la figura 2.1 (Van Gerpen *et al.*, 2004).



**Figura 2.1** Estructura de un triglicérido.



Donde las letras  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  representan las cadenas de grupos acilo de los ácidos grasos asociados con el aceite. Comúnmente, estos ácidos son oleico, esteárico, palmítico y linoleico que normalmente se encuentran en estado natural en aceites y grasas. En su forma libre, los ácidos grasos tienen la configuración mostrada en la figura 2.2, donde R es una cadena de hidrocarburo con más de 10 átomos de carbono.



**Figura 2.2** Estructura de un ácido graso.

En la reacción química que ocurre durante el proceso de producción de biodiesel, el catalizador que por lo regular se usa, es el hidróxido de potasio disuelto en metanol. En la figura 2.3, las letras  $R'$ ,  $R''$  y  $R'''$  indican las cadenas de ácidos grasos.



**Figura 2.3** Reacción de transesterificación.

La sustitución parcial del diesel por un combustible producto de la transformación de semillas oleaginosas y el aprovechamiento de aceites residuales y grasas animales, es una realidad a corto plazo. En el Valle de Mexicali existen condiciones favorables para seguir con esta tendencia, la siembra de Higuierilla (*Ricinus Communis*) de las que se pretende extraer el aceite para la producción del biocombustible, tiene un potencial de desarrollo muy alto en este valle. Sin embargo, hay algunos puntos que se deben tomar en cuenta para llegar a tener un buen proceso de producción de biodiesel.



## 2.2 Especificaciones del biodiesel

Es necesario asegurar que el biodiesel con el que se trabaja, cumpla con las especificaciones indicadas por la American Society Testing and Materials (ASTM, 2008). Entre tales propiedades se encuentran: densidad, viscosidad, agua, iones alcalinos (Na) alcalino-térreos (Ca-Mg), ácidos grasos, glicerina. La Norma ASTM D 6751, especifica las pruebas que deben efectuarse para determinar las propiedades del biodiesel y caracterizarlo como tal. Entre las pruebas más comunes se encuentran: glicerina libre y total, gravedad específica, viscosidad cinemática, punto flash, temperatura de destilación, número de cetano, punto de nube, corrosión de tiras de cobre y número ácido entre otras, las cuales se resumen en la tabla 2.1 (Van Gerpen et al., 2004).

**Tabla 2.1** Especificación del biodiesel

| <b>PROPIEDAD</b>                 | <b>MÉTODO</b> | <b>LÍMITES</b>             | <b>UNIDADES</b>    |
|----------------------------------|---------------|----------------------------|--------------------|
| Punto de ignición                | D93           | 130 min                    | °C                 |
| Agua y sedimento                 | D2709         | 0.05 max                   | % volumen          |
| Viscosidad cinemática            | D445          | 1.9 – 6.0                  | mm <sup>2</sup> /s |
| Ceniza sulfatada                 | D874          | 0.02 max                   | % en peso          |
| Azufre total                     | D5453         | 0.05 max                   | % en peso          |
| Corrosión de tiras de cobre      | D130          | No. 3 max                  |                    |
| Número de cetano                 | D613          | 47 min                     |                    |
| Punto de nube                    | D2500         | Reportado                  | °C                 |
| Residuo de carbono               | D4530         | 0.05 max                   | % en peso          |
| Número ácido                     | D664          | 0.8 max                    | mgKOH/g            |
| Glicerina libre                  | D6584         | 0.02                       | % en peso          |
| Glicerina total                  | D6584         | 0.24                       | % en peso          |
| Fósforo                          | D4951         | 0.001                      | % en peso          |
| Destilación al vacío punto final | D1160         | 360°C max, 90% destilación | °C                 |



## CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Simulación de la etapa de combustión un ciclo diesel.

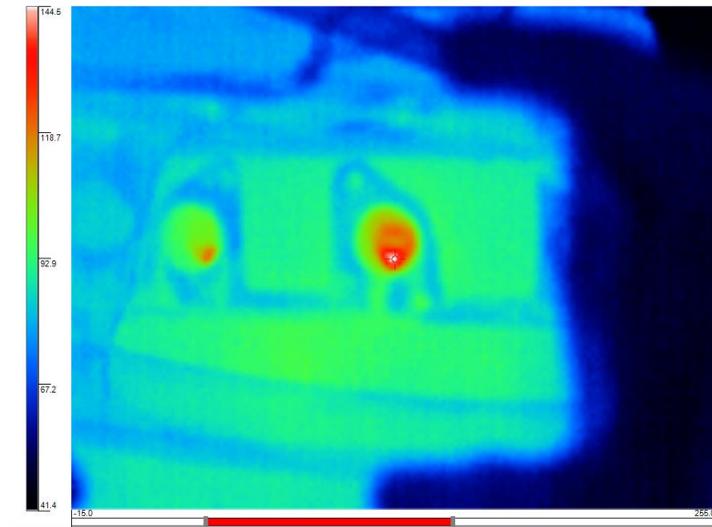
#### 3.1.1 Modelo de Simulación

Para realizar la simulación se utilizó el Software Aspen®, herramienta que permite simular procesos de combustión de un ciclo diesel, considerando las condiciones de operación de un motor diesel de 3 pistones, mostradas en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Descripciones técnicas del motor tomado como referencia

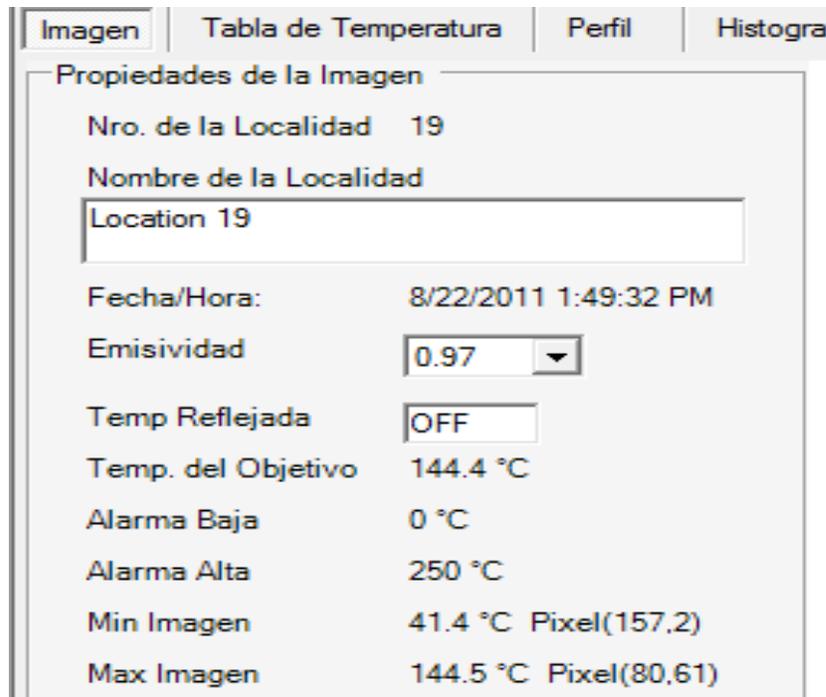
| Especificación         | Textron KUBOTA D600-B         |
|------------------------|-------------------------------|
| Tipo                   | Diesel, inyección directa     |
| Alimentación           | Presión atmosférica           |
| Desplazamiento         | 600 cc                        |
| Configuración          | 3 Cilindros en línea 4 Ciclos |
| Diámetro X carrera     | 64 X 62.2 (mm)                |
| Relación de compresión | 18                            |
| Consumo                | 0.48 kg/ h                    |
| Potencia               | 16.5 HP                       |

En la simulación se realizaron corridas con mezclas diesel-biodiesel B5, B10, B20, B50, B100 (donde el número consecutivo a la letra B denota el porcentaje de biodiesel presente) y diesel en las cuales se utilizó una relación aire-combustible de 1:15, (K. Shaine, 2001). Como información adicional se alimentó al simulador con datos de temperatura de gases de combustión medidos con una cámara termográfica Fluke Ti30 con rango de temperatura de -15 hasta 255 °C, como se ilustra en la figura 3.1. Las lecturas de temperaturas se tomaron en la salida de los gases de escape del block del motor KUBOTA D600-B. Se consideró una presión dentro de la cámara de combustión de 4.6 MPa, basada en el manual del motor (Kubota, 1985)



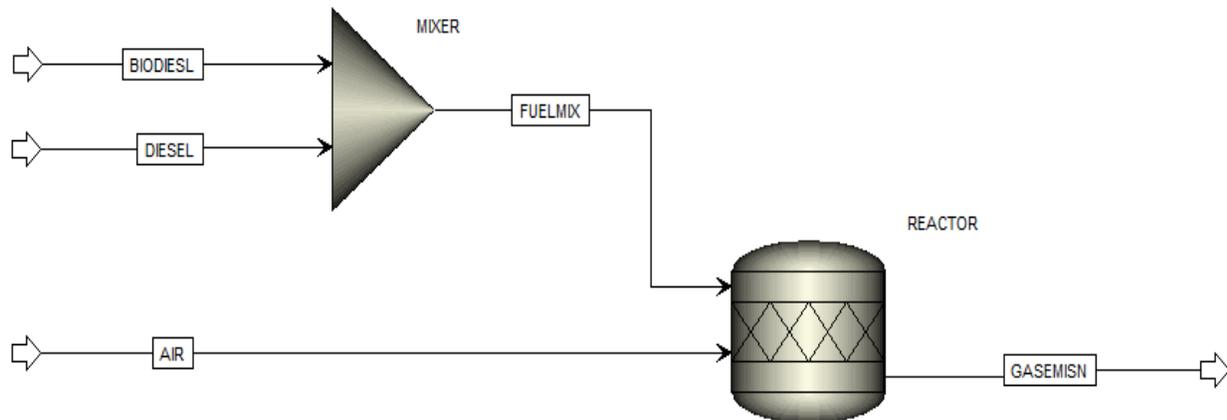
**Figura 3.1** Imagen térmica tomada en la salida de los gases de combustión del block del Motor.

La imagen térmica muestra que la temperatura máxima corresponde a la zona del block como se muestra en la figura 3.2, muestra el registro de la temperatura, con un valor de 144.4°C.



**Figura 3.2** Resultados de temperatura de la imagen termográfica.

Para realizar la simulación de combustión de las mezclas de combustibles, se definieron las corrientes de entrada al mezclador, para obtener la corriente de salida FUELMIX, ver figura 3.3 En la corriente AIR, se especificó la mezcla en porcentaje de aire estándar compuesta en un 21% O<sub>2</sub> y un 79% N<sub>2</sub>. Cabe mencionar que se consideró un exceso de aire para asegurar una combustión completa.



**Figura 3.3** Diagrama de proceso.

En lo que corresponde a la combustión, se realizó la simulación, para lo cual se utilizó un modelo de reactor ideal. Las condiciones de entrada se muestran en la tabla 3.2, se establecieron condiciones de los componentes de alimentación. La corriente de proceso denominada GASEMISN está conformada por los productos de combustión: CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.



**Tabla 3.2** Condiciones de alimentación de la simulación

| Condiciones de la simulación a 25 °C y 1 atm |          |        |          |           |          |           |          |          |          |           |          |           |
|--|----------|--------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Flujo másico (kg/h)                          | Diesel   |        | B5       |           | B10      |           | B20      |          | B50      |           | B100     |           |
|  | Aire     | Diesel | Aire     | B5        | Aire     | B10       | Aire     | B20      | Aire     | B50       | Aire     | Biodiesel |
| Metil Oleate                                 | 0        | 0      | 0        | 9.70E-04  | 0        | 1.93E-03  | 0        | 3.86E-03 | 0        | 9.65E-03  | 0        | 0.0193    |
| Metil Linoleate                              | 0        | 0      | 0        | 1.07E-03  | 0        | 2.14E-03  | 0        | 4.29E-03 | 0        | 0.010715  | 0        | 0.02143   |
| Metil Ricinoleate                            | 0        | 0      | 0        | 0.0222027 | 0        | 0.0444055 | 0        | 0.088811 | 0        | 0.2220275 | 0        | 0.444055  |
| Metil Palmitate                              | 0        | 0      | 0        | 2.72E-04  | 0        | 5.43E-04  | 0        | 1.09E-03 | 0        | 2.72E-03  | 0        | 5.43E-03  |
| Metil Stearate                               | 0        | 0      | 0        | 2.72E-04  | 0        | 5.43E-04  | 0        | 1.09E-03 | 0        | 2.72E-03  | 0        | 5.43E-03  |
| Metil Linolenate                             | 0        | 0      | 0        | 1.09E-04  | 0        | 2.18E-04  | 0        | 4.36E-04 | 0        | 1.09E-03  | 0        | 2.18E-03  |
| Metil Eicosenoate                            | 0        | 0      | 0        | 1.09E-04  | 0        | 2.18E-04  | 0        | 4.36E-04 | 0        | 1.09E-03  | 0        | 2.18E-03  |
| Diesel                                       | 0        | 0.5    | 0        | 0.475     | 0        | 0.45      | 0        | 0.4      | 0        | 0.25      | 0        | 0         |
| Oxígeno                                      | 12.98367 | 0      | 12.84675 | 0         | 12.11691 | 0         | 12.43662 | 0        | 11.61615 | 0         | 10.24863 | 0         |
| Nitrógeno                                    | 48.84333 | 0      | 48.32825 | 0         | 47.81396 | 0         | 46.78538 | 0        | 43.69885 | 0         | 38.55437 | 0         |



### 3.1.2 Composición de combustibles

Para representar al biodiesel, se alimentaron en la base de datos del simulador, las propiedades físicas, químicas y termodinámicas del ricinoleato de metilo (C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>3</sub>) el cual es el éster que corresponde al ácido graso ricinoleico, componente principal del aceite de ricino. Se utilizó la siguiente composición de metilésteres para la simulación de biodiesel de higuerrilla (Refaat, at 2010), como se puede apreciar en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Composición de metil ésteres de biodiesel de higuerrilla

| Metiléster        | Fracción (%) | Fórmula  |
|-------------------|--------------|--|
| Metil Ricinoleate | 88.811       | C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>3</sub> |
| Metil Linoleate   | 4.286        | C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> |
| Metil Oleate      | 3.860        | C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> |
| Metil Stearate    | 1.086        | C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> |
| Metil Palmitate   | 1.086        | C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> |
| Metil Linolenate  | 0.436        | C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> |
| Metil Eicosenoate | 0.436        | C <sub>21</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub> |

Se consideró como molécula representativa del diesel al hexadecano (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>) debido a que tiene un poder calorífico inferior de 43.94 MJ/kg, muy semejante al reportado para el diesel mexicano con un valor de 44.04 MJ/kg (SENER, 2009).

### 3.1.3 Método Termodinámico

Para seleccionar un método termodinámico apropiado para simular un proceso, se tomaron en cuenta cuatro factores, la naturaleza de las propiedades de interés, la composición de las mezclas, rangos de presión y temperatura; así como la disponibilidad de parámetros. El método base elegido fue SR-POLAR. Se utilizó la herramienta de ASPEN de nombre *Assistant-Property method selection*, para corroborar el método base para correr la simulación, dando como resultado el método base SR-POLAR (Carlson EC 1996).



### 3.1.4 Reacciones químicas

Las reacciones químicas consideradas en la combustión de los metil ésteres (biodiesel), diesel y sus diferentes mezclas (B5, B10, B20, B50) que alimentaron al simulador, se muestran en la tabla 3.4. La composición del biodiesel, es decir, los porcentajes de metil ésteres presentes que determinan las propiedades del mismo, esto es su PCI, Viscosidad cinemática, punto de fusión, punto de nube, número de cetano, punto de ebullición (Kubota, 1985).

**Tabla 3.4** Reacciones químicas del proceso de combustión de metil ésteres y diesel.

| Reacción No. | Compuesto             | Estequiometría                                     |
|--------------|-----------------------|--|
| 1            | Metil Ricinoleato     | $C_{19} H_{36} O_3 + 26.5 O_2 = 18 H_2O + 19 CO_2$ |
| 2            | Metil Oleato          | $C_{19} H_{36} O_2 + 27 O_2 = 18 H_2O + 19 CO_2$   |
| 3            | Metil Linoleato       | $C_{19} H_{34} O_2 + 26.5 O_2 = 17 H_2O + 19 CO_2$ |
| 4            | Metil Stearato        | $C_{19} H_{38} O_2 + 27.5 O_2 = 19 H_2O + 19 CO_2$ |
| 5            | Metil Palmitato       | $C_{17} H_{34} O_2 + 24.5 O_2 = 17 H_2O + 17 CO_2$ |
| 6            | Metil Linolenato      | $C_{19} H_{32} O_2 + 26 O_2 = 16 H_2O + 19 CO_2$   |
| 7            | Metil Eicosenoato     | $C_{21} H_{40} O_2 + 30 O_2 = 20 H_2O + 21 CO_2$   |
| 8            | Diesel (N-Hexadecano) | $C_{16} H_{34} + 24.5 O_2 = 17 H_2O + 16 CO_2$     |

### 3.1.5 Resultados

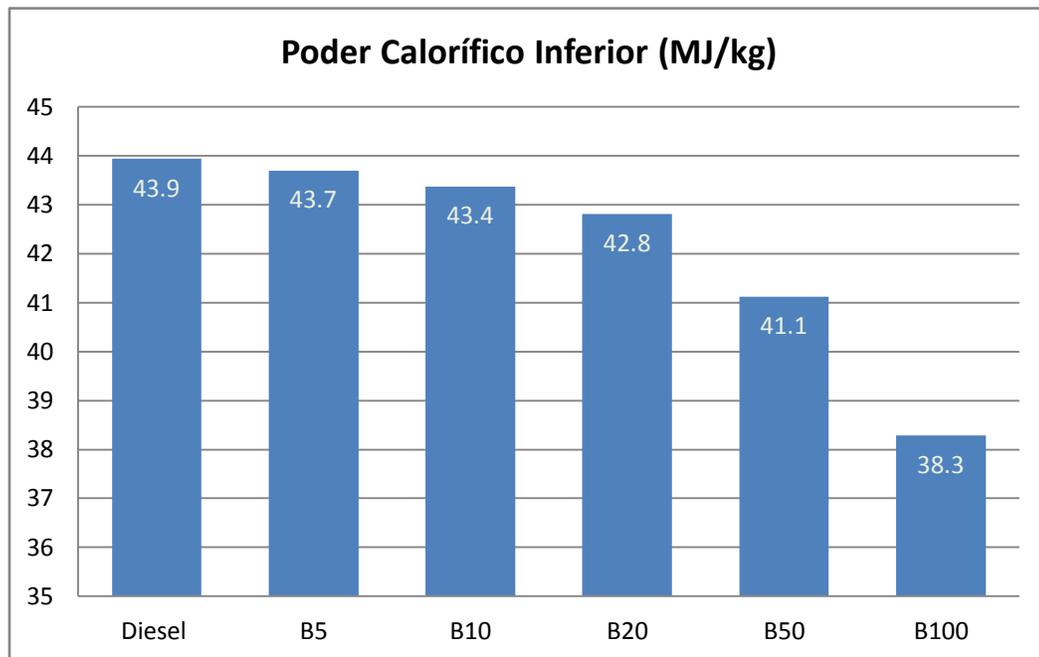
Una vez ingresados los datos en el simulador, se obtuvieron los poderes caloríficos para cada uno de los metil ésteres que conforman el biodiesel obtenido a partir de la higuierilla como se muestra en la Tabla 3.5. Es de esperarse que el Poder Calorífico Inferior del biodiesel (PCI), sea lo más aproximado al del ricinoleato de metilo, debido a que este último es el compuesto que se encuentra en mayor porcentaje de la composición, 88.81%.



**Tabla 3.5** Poder calorífico inferior de metil ésteres derivados del aceite de higuera.

| <b>Metil Esteres</b> | <b>Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)</b> |
|----------------------|--|
| Metil Oleato         | 37.43                                    |
| Metil Linoleato      | 40.13                                    |
| Metil Ricinoleato    | 38.16                                    |
| Metil Palmitato      | 39.12                                    |
| Metil Estearato      | 42.82                                    |
| Metil Linolenato     | 37.51                                    |
| Metil Eicosenoato    | 40.84                                    |

Los resultados reflejan que el B100 presenta un PCI menor comparado con el del diesel, con una variación del 12.85%, por lo que el PCI de las diferentes mezclas diesel-biodiesel tienen una tendencia a disminuir como se puede observar en la figura 3.4. Dichos resultados son congruentes con los datos reportados por diferentes autores (Heywood J, 1988, Canakci M, Gerpen JV, 1999, Vyas A, Verma J, Subrahmanyam N, 2010).



**Figura 3.4** Poder calorífico de los combustibles.

La disminución del poder calorífico tanto del biodiesel como sus mezclas, representa una desventaja importante comparado con el diesel, puesto que implica repercusiones directas que se reflejarán en un descenso de la potencia del motor, así como un incremento en el consumo de combustible, ya que al tratar de obtener la misma potencia, se incrementa el consumo de combustible.

Una de las ventajas más importantes que tiene el biodiesel, es el beneficio ambiental, ya que su utilización representa una oportunidad para contribuir en la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Ello ayudaría al mejoramiento de la calidad de aire y salud pública en cuanto a enfermedades crónicas respiratorias se refiere. Si bien la tabla 3.6 indica la disminución de emisiones al aumentar la concentración de biodiesel, es necesario considerar los aspectos y retos técnicos así como de compatibilidad con materiales del motor con los que está en contacto el combustible. Esto es necesario para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema en el que se implemente el uso de biodiesel.



**Tabla 3.6** Emisiones de diesel, biodiesel y mezclas.

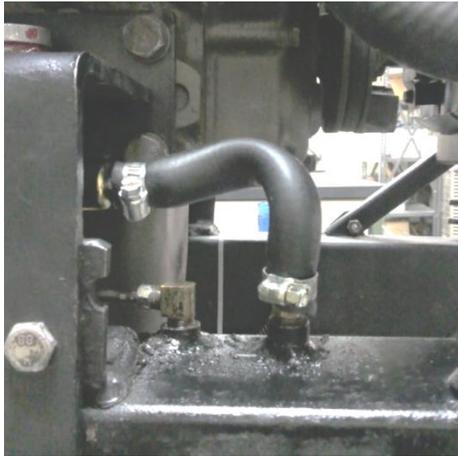
| Gases de combustión a 144.5 °C y 4.6 MPa |         |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Flujo másico (kg/hr)                     | B5      | B10     | B20     | B50     | B100    | Diesel  |
| H <sub>2</sub> O                         | 0.2340  | 0.2313  | 0.2258  | 0.2095  | 0.1824  | 0.2367  |
| O <sub>2</sub>                           | 12.2473 | 12.1169 | 11.8562 | 11.0739 | 9.7701  | 12.3778 |
| CO <sub>2</sub>                          | 0.5405  | 0.5369  | 0.5296  | 0.5077  | 0.4712  | 0.5442  |
| N <sub>2</sub>                           | 48.3283 | 47.8140 | 46.7854 | 43.6989 | 38.5544 | 48.8433 |

### 3.2 Pruebas y adaptación de prototipo

#### 3.2.1 Evaluación del motor, empaques, piezas y sistema de alimentación.

Es importante evaluar empaques, piezas y sistema de alimentación del motor TEXTRON modelo D600-B diesel, algunas de estas piezas no están diseñadas para trabajar con mezclas de diesel-biodiesel, puesto que son de materiales no compatibles o cuentan con baja calidad en su elaboración, (Starbuck y Gavin, 2009). Por ello, se realizaron pruebas cualitativas de corrosión sobre piezas, compatibilidad de elastómeros, compresibilidad del sistema de inyección, y se evaluó la formación de depósitos por precipitación de productos del envejecimiento del biocombustible.

Una vez que se cambiaron las mangueras al sistema de alimentación del motor KUBOTA D600-B, después de 50 horas de operación, se observó que una de las mangueras que conectaba el tanque de almacenamiento con el filtro de combustible, se había deformado físicamente como lo muestra la figura 3.5. Se llegó a la conclusión de que fue debido a la incompatibilidad de materiales con el biodiesel. Sin embargo, se realizó una investigación, y se concluyó que las mangueras que traía el motor eran para trabajar con gasolina, entonces se cambiaron por mangueras para trabajar con diesel.



**Figura 3.5** Manguera del sistema de alimentación deformada.

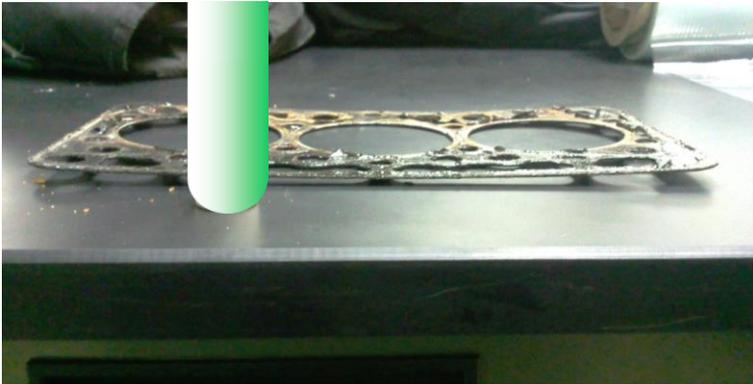
El motor presentó fugas de aceite por los empaques de la bomba de alta presión, por ello fue necesario desarmarla y se observó que tales empaques se deformaron, como se muestra en la figura 3.6; cabe la posibilidad de que las fugas se deban a la utilización de biodiesel, o que los empaques del motor ya estaban muy viejos.



**Figura 3.6** Deformación de empaques de la bomba de alta presión.

También se afectó el empaque de la cabeza del motor, se desmontó el empaque, el cual se observó que estaba pandeado como se muestra en la figura 3.7, y contenía restos de silicón rojo. Mediante una revisión cualitativa, se observó que un empaque estaba roto y mal instalado, pues no se debe poner silicón en empaques de metal. La

fuga de aceite pudo deberse a que los vapores de la combustión dañaron el silicón o que el empaque estaba muy viejo y degradado.



**Figura 3.7** Empaque del motor deformado.

Partiendo de estos hechos, se procedió a realizar pruebas aceleradas de materiales inmersos en mezclas diesel-biodiesel como se observa en las figuras 3.8, utilizando la manguera que normalmente se vende en los autoservicios para camiones diesel de transporte urbano en Mexicali, aclarando que se utilizó sólo una marca de mangueras. Se sometieron a mezclas de B5, B10, B20, diesel mexicano, diesel EUA, y un blanco como referencia, se sometieron muestras a temperatura ambiente de 25 °C, y a temperatura 75 °C.



**Figuras 3.8** Muestras de mangueras expuestas a temperaturas 25 °C y 75°C.

Se realizó un diseño de experimentos para observar en qué medida afecta las mezclas biodiesel-diesel a las mangueras, tratando de que la experimentación fuese lo más apegada a lo que marca la norma ASTM D 471, de manera que ofrezca resultados confiables. de manera los resultados sean confiables. Para hacer el diseño de experimentos, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: temperatura del diesel, tiempo de exposición y mezcla de combustibles.

Después de que las mangueras fueron expuestas a pruebas de inmersión, se aplicó un análisis de esfuerzo- deformación utilizando un Equipo de Pruebas Universal Electromecánico MTS modelo Insight 100 extended length, colocando cada muestra en la prensa, como se muestra en la figura 3.9. De igual manera se tomó un blanco como referencia para conocer el estado de las propiedades físicas; en que proporción afecta la exposición a la mezcla de combustibles, y qué mezcla es la que afecta menos, teniendo como variable de respuesta el porcentaje de cambio de masa. Actualmente, se están analizando los resultados para su publicación.



**Figura 3.9** Equipo de pruebas universal electromecánico MTS modelo Insight 100 extended length.

Para conocer la temperatura del diesel a la cual opera realmente un camión de transporte en Mexicali B.C. se colocó un sistema de adquisición de datos para sensores termopares, en el tanque de combustible como se muestra en la figura 3.10, durante un mes.



**Figura 3.10** Instalación de termopares y sistema de adquisición de datos.

### **3.2.2 Caracterización del motor diesel de combustión interna**

Es importante contar con un banco de pruebas instrumentado para experimentación, en donde se montó el motor y sus componentes, debiendo tomar en cuenta la instalación de sistemas de alimentación, un filtro en la entrada de aire al motor, un extractor para gases de escape, un catalizador en la salida del múltiple de escape, un silenciador enseguida del catalizador y un freno hidráulico.

### **3.2.3 Adquisición de datos**

Fue de vital importancia contar con un equipo para la adquisición de datos que debió instrumentarse para poder capturar y guardar los siguientes parámetros: temperatura, presión, consumo de combustible.

### 3.2.4 Puesta en marcha de motor 1 prototipo

Para empezar a realizar las pruebas de combustión de mezclas de combustibles, se procedió a conseguir un motor en el cual se pudiera llevar a cabo la experimentación, se consiguió un motor diesel V8 Mercedes-Benz, ver figura 3.11, para comenzar a experimentar con mezclas diesel-biodiesel, no se conocía el estado en que se encontraba el motor. Se le desmontó la transmisión con la finalidad de reducir espacio y quitarle peso al motor.

Se puso en marcha el motor, pero no se mantenía prendido por más de 2 minutos, esto era utilizando etanol atomizado para ayudar a una rápida ignición. Se llegó a la conclusión que los anillos de los pistones estaban demasiado desgastados, no lograban una buena compresión dentro de la cámara de combustión, suficiente para comprimir el aire y calentarlo por compresión hasta la temperatura de ignición del diesel, esto daba como resultado el no realizar una combustión completa. El costo de la reparación de los anillos tendría un precio alto, y tardaría demasiado en realizarse, sumando al hecho que el motor era demasiado grande para trabajar a nivel laboratorio.

Por lo que se descartó la utilización del motor Diesel V8 Mercedes-Benz.



**Figura 3.11** Motor diesel, Mercedes-Benz V8.



### 3.2.5 Mantenimiento en general, y puesta en marcha del motor 2.

Se procedió a conseguir otro motor diesel, tratando que fuera lo más pequeño posible. Para realizar las pruebas, se consiguió un motor de marca y modelo KUBOTA D600-B diesel de 3 pistones, con un volumen de 600 cc, que cuenta con las especificaciones mostradas en la tabla 3.7. Considerando que el consumo de combustible es menor, porque es un motor con una cilindrada pequeña, a nivel laboratorio resultó beneficioso. De igual manera se procedió a ponerlo en marcha, no presentó ningún problema operativo en el motor, al igual que en ninguno de sus sistemas de operación.

**Tabla 3.7** Especificaciones del motor Kubota D600-B

| <b>Especificación</b>  | <b>Textron KUBOTA D600-B</b>  |
|------------------------|-------------------------------|
| Tipo                   | Diesel, inyección directa     |
| Alimentación           | Presión atmosférica           |
| Desplazamiento         | 600 cc                        |
| Configuración          | 3 Cilindros en línea 4 Ciclos |
| Diámetro X carrera     | 64 X 62.2 (mm)                |
| Relación de compresión | 18                            |
| Consumo                | 0.48 kg/ h                    |
| Potencia               | 16.5 HP                       |

A continuación se presentan las figuras 3.12 y 3.13, mostrando el avance que se tuvo, así como el mantenimiento preventivo y correctivo que se le proporcionó. Se reemplazó la bomba eléctrica de baja presión, las mangueras del sistema de combustión, el cableado eléctrico, el aceite, el anticongelante, el tapón de radiador, el filtro de aceite, el filtro de combustible y el filtro del aire.



**Figuras 3.12** Motor diesel Kubota D600–B, Condiciones iniciales.



**Figuras 3.13** Motor diesel Kubota D600–B, condiciones finales.

El siguiente paso fue fabricar una estructura para montar el motor como se muestra en la figura 3.14, utilizando tal estructura para poderlo transportar fácilmente. Al montar el motor en la base, se tuvo problemas con las vibraciones causadas por el motor, se solucionó el problema colocando caucho entre los tornillos de sujeción y la estructura.



**Figura 3.14** Fabricación de estructura.

Se purgaron las líneas de combustible del motor, y se limpió el depósito de combustible para llenarlo con B20 (20% biodiesel, 80% diesel), se utilizó biodiesel a base de 80% biodiesel de canola, 20 % biodiesel de girasol, con el fin de conocer el consumo de combustible del motor como se muestra en la tabla 3.8, se llegó a la conclusión que el motor tiene un consumo de 0.5 kg/h. Las mediciones fueron tomadas desde el arranque del motor hasta el paro de la prueba, tomando en cuenta que la temperatura del refrigerante y la presión de aceite del motor, se estabilizó a los 20 minutos a partir del inicio.

**Tabla 3.8** Consumo de combustible del motor.

| <b>Consumo de 248 g/30 min</b> |            |                 |
|--------------------------------|------------|-----------------|
| T<br>(F°)                      | P<br>(Psi) | Tiempo<br>(min) |
| 115                            | 48         | 5               |
| 120                            | 36         | 10              |
| 124                            | 29         | 15              |
| 128                            | 25         | 20              |
| 128                            | 24         | 25              |
| 128                            | 24         | 30              |

### 3.3 Obtención de biodiesel y pruebas de calidad

#### 3.3.1 Determinación de la cantidad de aceite contenido en la semilla de higuerilla.

Otro de los trabajos desarrollados durante esta investigación, fue analizar la cantidad de aceite contenido en la semilla de higuerilla, ya que es una de las materia primas que es factible de utilizar para elaborar biodiesel. Para la extracción del aceite se utilizó una prensa de extracción mecánica en frío como se observa en la figura 3.15. El nombre de la prensa es STORK TRONIC ST-10, capacidad de procesamiento 1.5 kg/h, con rangos de temperatura de operación de 25 °C a 140 °C, velocidad de proceso en rangos de 1 al 10, la prensa puede trabajar con semilla de algodón, girasol, higuerilla y jatropha.



**Figura 3.15** Prensa utilizada para la extracción de aceite de semillas.

Para poner a funcionar la prensa se deben seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar la boquilla para trabajar con extracción.
2. Encender la prensa a velocidad mínima
3. Mantener la temperatura del cinturón a 100 °C por un lapso de tiempo de entre 10 a 15 minutos.
4. Elegir la temperatura de operación.
5. Alimentar la prensa poco a poco con el material de trabajo (Semilla), hasta juntar una cantidad de semilla en la tolva.



6. Aumentar la velocidad de prensado (según se requiera el caso).
  - Baja velocidad = Proceso de extracción lento, Alto rendimiento
  - Alta velocidad = Proceso de extracción rápido, Bajo rendimiento.
7. Al terminar el proceso de extracción, apagar el cinturón posteriormente apagar la prensa.
  - ❖ Para el caso de prensado de higuera, realizar un último paso.

No apagar la prensa, simplemente, dejar de alimentar con semilla y retirar la tapa de la boquilla inmediatamente, esto para evitar taponamiento.

Se consiguió semilla de higuera, donada por Instituto de Ciencias Agrícolas, UABC, se proporcionaron 2 tipos de semilla, clasificada como semilla regular y semilla modificada, la semilla venía encostalada y era semilla entera con cascara. Se procedió a determinar algunas características de la semilla como se muestra en la tabla 3.9, separando la cáscara e impurezas de la semilla.

**Tabla 3.9** Peso en % de la semilla de higuera.

| Características de la semilla              | Semilla de higuera |                    |
|--|--------------------|--------------------|
|  | Semilla regular    | Semilla modificada |
| Peso de la semilla entera, con cáscara (g) | 120.005            | 100.596            |
| Peso de la almendra, sin cáscara (g)       | 48.248             | 62.064             |
| % de peso de almendra por semilla entera   | 0.40               | 0.62               |

Como se muestran en las figuras 3.16, se midieron las semillas con la finalidad de llevar un control. Con respecto a medidas generales de la semilla, éstas son unidades en mm, se comparó el porcentaje de cáscara con respecto al peso de la almendra.

► **Semilla regular**



► **Semilla modificada**



**Figuras 3.16** Caracterización de semillas regular y modificada.

Se procedió a moler la semilla en un mortero, para después realizar la extracción de aceite por solvente utilizando el método Soxhlet como lo muestra la figura 3.17, utilizando como solvente Hexano, teniendo como resultado:

- % aceite semilla regular: **34.35%**
- % aceite de semilla modificada: **43.64%**



**Figura 3.17** Sistema de extracción Soxhlet, montado en los laboratorios del Tecnológico de Mexicali.

Se realizó la prueba de extracción por solvente, porque es nuestro punto de referencia para la obtención del % máximo de aceite que podemos obtener de las muestras. Posteriormente se procedió a realizar la extracción de aceite de las mismas semillas, pero por extracción de prensado mecánico en frío, realizado con la prensa antes mencionada. Cuando se realizaban las pruebas para la obtención de aceite por prensado mecánico, no se encontraba el punto en donde se obtenía la mayor extracción de aceite combinando temperatura de operación, tamaño de boquilla, velocidad del tornillo sinfín y la cantidad de semilla agregada al inicio del prensado, para que no se taponara la boquilla de salida de la prensa, es por eso que se realizó un diseño de experimentos, para encontrar el punto óptimo de extracción de aceite con mayor rendimiento, como se muestra en la tabla 3.10.



**Tabla 3.10** Diseño de experimentos para extracción de aceite de higuera.

| <b>Diseño de experimentos</b> |                      |                      |                      |                      |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                               | <b>T1</b>            |                      | <b>T2</b>            |                      |
|                               | <b>B1</b>            | <b>B2</b>            | <b>B1</b>            | <b>B2</b>            |
| <b>V1</b>                     | <b>R1, R2, R3</b>    | <b>R4, R5, R6</b>    | <b>R7, R8, R9</b>    | <b>R10, R11, R12</b> |
| <b>V2</b>                     | <b>R13, R14, R15</b> | <b>R16, R17, R18</b> | <b>R19, R20, R21</b> | <b>R22, R23, R24</b> |

Se manejan los siguientes factores para el diseño de experimentos:

- Temperaturas T1 = 110 °C y T2 = 130 °C
- Velocidades de operación V1= 1 y V2= 3
- Boquillas B1= 4 mm Y B2= 6 mm
- Las muestras tendrán un peso de 250 g

Se realizaron algunas pruebas sin tener éxito con semilla regular, para acercarnos al punto de operación con mayor rendimiento, como se muestra la tabla 3.3.3; el diseño de experimentos no se llevó a cabo, está pendiente por realizarse.



**Tabla 3.11** Resultados de pruebas de extracción de aceite.

| No | Temp. °C | Boquilla (mm) | V | T (min) | Desempeño | Observaciones   | Mantenimiento general   |
|----|----------|---------------|---|---------|-----------|---|---|
| 1  | 70       | 5 mm          | 1 | 5       | 1         | Bloqueo al poco tiempo de operación, banda desajustada                | Precalentar la prensa por 10 a 15 minutos a 100 °C  |
| 2  | 100      | 5 mm          | 1 | 5       | 2         | Se obtuvo aceite, la torta se tostó, bloqueo                          | Para limpiar, quitar la boquilla y dejar el tornillo trabajar para que saque el resto de la torta |
| 3  | 100      | 6 mm          | 3 | 6       | 1         | Mínima producción de aceite, torta no tostada, se taponeó la boquilla |   |
| 4  | 95       | 6 mm          | 2 | 5       | 1         | Mínima producción de aceite, se taponeó la boquilla                   |   |
| 5  | 100      | 4 mm          | 3 | 2       | 1         | Nula producción de aceite, se taponeó                                 |   |
| 6  | 100      | 8 mm          | 2 | 2       | 2         | Se obtuvo material aceitoso claro, se taponeó                         |   |
| 7  | 100      | 8 mm          | 2 | 10      | 3         | Se obtuvo aceite continuamente.                                       |   |

### 3.3.2 Transesterificación de aceite de *jatropha curcas*.

Se utilizó aceite de *jatropha curcas* de Colombia para hacer biodiesel, en los laboratorios de la UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. En el Grupo de Procesos Fisicoquímicos Aplicados, se desarrollaron los siguientes pasos:

1. Se agregó 10 Kg de aceite de *jatropha* a un reactor instrumentado ver figura 3.18, el cual cuenta con agitación, para mantener la mezcla homogénea, cuenta con calentamiento del reactor con aceite por baño maría, también tiene un intercambiador de calor dentro del reactor, esto para tener mayor control de la temperatura dentro del reactor. Cuenta con un intercambiador de calor para recuperación de metanol como se muestra la figura 3.18.



**Figura 3.18** Reactor utilizado para hacer biodiesel.

1. Se realizó esterificación al aceite, se agregó metanol y ácido sulfúrico como catalizador en una relación por cada 100 gramos de aceite, usamos 23 gramos de metanol y 1,5 gramos de ácido sulfúrico.
2. Después de la reacción, se tomó una muestra y se midió la acidez, la cual marcó 0.07 mm KOH.
3. Se realizó transesterificación utilizando como catalizador hidróxido de potasio= 129.92 gr, disuelto en metanol= 2.05 Kg, y se agregó al reactor, ver figura 3.19.



**Figura 3.19** Agregando catalizador para llevar a cabo la reacción de transesterificación.

4. Se vierte la solución en el reactor que está en agitación aprox. 60 °C. Se deja en agitación a 60 °C, durante 1 h.
5. 20 min después se tomó una muestra, para observar la reacción, la experiencia dice que se alcanza un 90% de la reacción, que es la pureza de metil ésteres, el tiempo sobrante se utiliza para elevar, el porcentaje hasta un 96% como máximo, que es la pureza de metil ésteres contenidos en el biodiesel, la norma europea EN14112 pide un mínimo de 92%. El cromatógrafo de gases dirá la cantidad de transformación de ácidos que fueron convertidos en biodiesel.

6. El paso siguiente es suministrar un ácido para neutralizar la reacción, pueden ser dos tipos de ácidos: clorhídrico o sulfúrico, para el fin en el que se utilizará el biodiesel no se requiere con trazos de ácido, por el tipo de pruebas que se van a realizar con este biodiesel, las cuales consisten en pruebas de inmersión de metales en biodiesel para observar el efecto de corrosión. Entonces, si el biodiesel contiene ácidos, se verían alteradas las pruebas. Se debe considerar tener por debajo del 1% de ácidos, que no pase o se acerque al porcentaje de ácidos que contienen los ácidos grasos de un aceite mineral o se puede considerar un buen biodiesel para dicho experimento, si el rango de acidez se encuentra cercano al de los ácidos grasos libres contenidos en el aceite de jatroha.
  
7. Se procede a retirar la glicerina por decantación y se purga del reactor ver figura 3.20, en esta toma se puede observar glicerina diluida en metanol, y una pequeña capa de biodiesel. Se purga el reactor hasta extraer todo el metanol.



**Figura 3.20** Muestra de metanol con biodiesel extraído del reactor.

8. Se procedió a retirar el metanol del biodiesel, se enciende la agitación a se le suministra temperatura, para operar a 60 °C, para evaporar el metanol, y se condensa en un intercambiador de calor. Se recuperó muy poco metanol de la reacción.

9. Para poder lavar el biodiesel, se necesita que el reactor tenga el fondo cónico, esto ayuda a que el proceso de decantación sea más rápido. El reactor con el que se estaba fabricando el biodiesel no contaba con esa característica, el proceso se complicaba más, la solución fue utilizar partes del mismo reactor para fabricar una especie de mirilla con separación, como se muestra en la figura 3.21.



**Figura 3.21** Modificaciones al reactor, para mejorar la utilización.

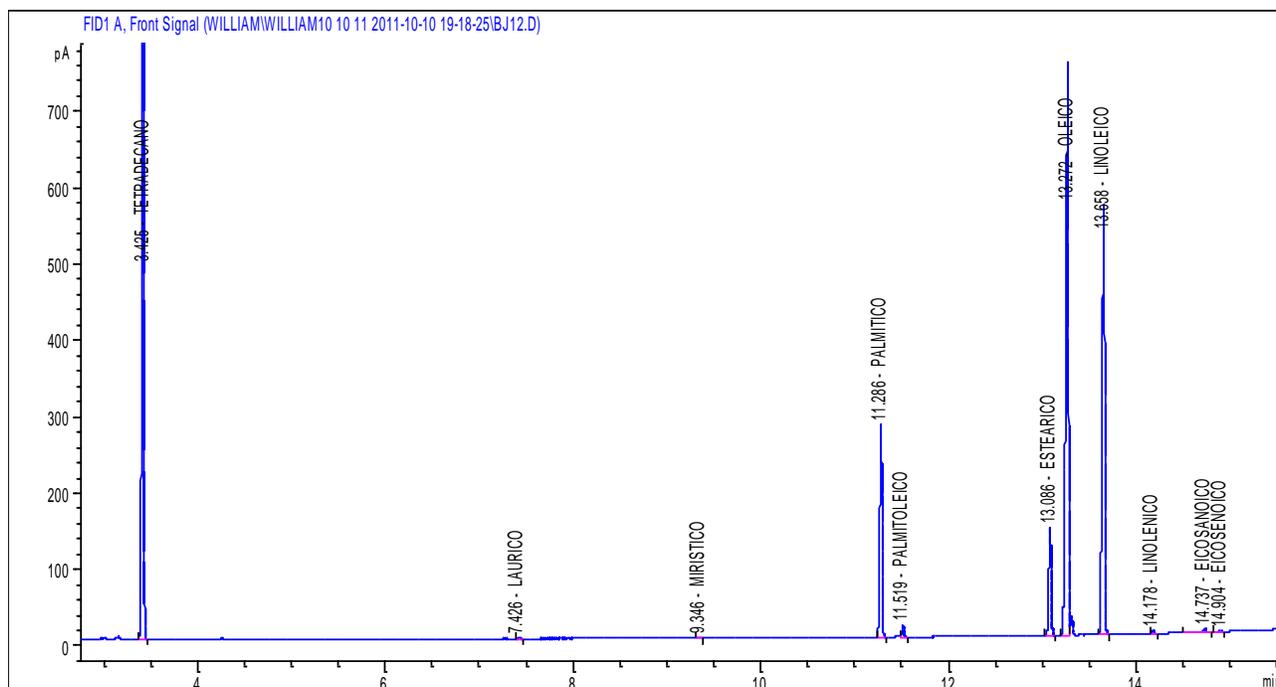
10. Utilizando agua caliente aproximadamente a 50 °C del mismo proceso, se lavó el biodiesel, esto ayuda a romper las dos fases que se forman como emulsión.
11. Se terminó de lavar el biodiesel, hasta que tuviera un PH= 7, se tomaban muestras para medir el PH, si el biodiesel llegaba a emulsionar, se le agregaba un poco de agua caliente del mismo proceso, ver figura 3.22.



**Figura 3.22** Lavado del biodiesel, con agua caliente.

### 3.3.3 Cromatografía de gases aplicada al biodiesel de jatropha.

Se tomó una muestra del biodiesel de Jatropha para realizarle una cromatografía de gases como se muestra en la figura 3.23, para cuantificar la cantidad de ácidos grasos convertidos en metil ésteres, y conocer la composición en porcentaje metil ésteres, este compuesto es el biodiesel final ver tabla 3.12.



**Figura 3.23** Cromatografía de biodiesel de jatropha.



**Tabla 3.12** Composición de los metil éster que conforman el biodiesel de Jatropha.

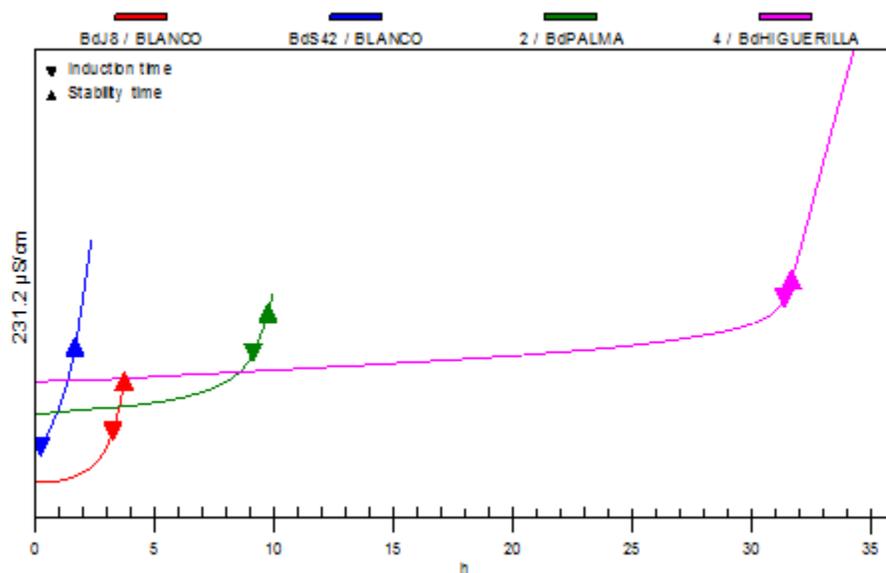
| <b>Compuesto</b> | <b>% Peso</b> |
|------------------|---------------|
| Láurico          | 0,13          |
| Mirístico        | 0,070         |
| Palmítico        | 13,572        |
| Palmitoleico     | 0,724         |
| Estearico        | 7,385         |
| Oleico           | 44,777        |
| Linoleico        | 30,627        |
| Linolénico       | 0,198         |
| Eicosenoico      | 0,308         |
| Eicosanoico      | 0,127         |
| Ricinoleico      | 0,000         |
| Total            | 97,800        |

### 3.3.4 Prueba de estabilidad oxidativa

La estabilidad oxidativa es muy importante, Norma Europea EN 14112 de abril del 2003, en donde se determina la estabilidad a la oxidación, a ésteres metílicos de ácidos grasos FAME, establece que los ésteres metílicos de ácidos grasos deben tener un mínimo de 6 horas antes de empezar con su oxidación, esto es para asegurar que en el motor, tanque de almacenamiento, o centros de distribución, no se te formen gomas o ácidos.

1. Se empezó la prueba lavando perfectamente todo el material del laboratorio, primero con jabón líquido detergente, después con isopropanol y por último con agua destilada.
2. Se prendió el equipo en donde se realizaron las pruebas, de nombre 873 Biodiesel Rancimat, se corrió el programa de precalentado del sistema a 110 °C, el equipo cuenta con dos bloques A y B.
3. Se programaron las variables de flujo de aire y temperaturas.

4. Se procedió a agitar los contenedores donde está el biodiesel para tomar una muestra mas homogénea.
5. Se procedió a pesar 3 gramos de muestra de biodiesel en celdas, clasificando los tubos de reacción.
6. Después se pesaron 50 gramos de agua destilada.
7. Cuando el equipo llegó a su punto de operación de 110 °C, se procedió a colocar 50 gramos de agua destilada en cada uno de los vasos de precipitado, para después colocarlos en posición en el equipo.
8. Se procedió a nombrar cada una de las muestras en el programa, dependiendo de su posición en el equipo.
9. Se puso a funcionar el equipo, el cual hace burbujear aire seco y filtrado, a través de la muestra de biodiesel, el aire arrastra productos de oxidación los cuales son solubles en agua como: aldehidos, ácidos orgánicos van oxidando el agua destilada, luego el aire pasa por el agua destilada burbujear, aumentando su conductividad eléctrica, al mismo tiempo que se midió y se registró en la computadora, ver figura 3.24.



**Figura 3.24** Estabilidad oxidativa del biodiesel de higuierilla y palma africana.

### 3.3.5 Prueba del Índice de acidez del biodiesel

Se realizó la prueba de índice de acidez al biodiesel de jatropha. Con la finalidad, como su nombre lo indica, de conocer el índice de acidez que tiene el biodiesel, según la norma NTC 218, Grasas y aceites vegetales y animales, determinación del índice de acidez y de la acidez. Para realizar la prueba, en un vaso de precipitado se pesan 1.5 gramos de biodiesel y se mantiene en agitación, durante toda la experimentación, después se adiciona 25 ml de solvente, luego se agrega yoduro de potasio saturado .05 ml. Se agita por un minuto. Se agrega 25 ml de agua destilada, se repite 3 veces la misma muestra, con la finalidad de tener repetitibilidad, al terminar cada muestra se lavó con agua destilada el bulbo y el inyector. Se colocó la muestra en el titulador, y se fue agregando tiosulfato de sodio, y se observa en el titulador cuanto tiosulfato se gasto, el titulador lo hace automáticamente, y cuantifica el índice de potencial de cambio al agregar tiosulfato de sodio ver figura 3.25.



**Figura 3.25** Resultado de prueba de índice de acidez del biodiesel de jatropha.

### 3.4 Evaluación de la operación de un motor diesel utilizando B20

#### 3.4.1 Prueba en motor Hatz, trabajando con régimen específicos y medición de potencia, emisiones, RPM.

Se realizaron pruebas en un motor diesel Hatz, que cuenta con características indicadas en la tabla 3.13, en los laboratorios de la Universidad de Antioquia, con el Grupo de Procesos Fisicoquímicos Aplicados GIMEL, operando con biodiesel de Palma Africana B20. El motor se encuentra montado en un banco de pruebas instrumentado. Se arregló el motor porque presentaba un ruido extraño, pues para poder hacer las corridas, se necesitaba que estuviera trabajando con normalidad. Se procedió a desmontar la cabeza del motor, quitando termopares, el múltiple de admisión y el múltiple de escape, hasta llegar a la cabeza del motor, una de las ventajas del motor Hatz es que las cabezas del motor son individuales. Se inspeccionó la cabeza y todo estaba en orden, se volvió a armar la cabeza del motor y su instrumentación.

Se concluyó que los tornillos que sujetan a la cabeza del motor, con el block, no tenía el torque indicado, se torquearon los tornillos para poner volver a armar.

**Tabla 3.13** Características del Motor Diesel Hatz.

| <b>Especificación</b> | <b>Textron KUBOTA D600-B</b> |
|-----------------------|------------------------------|
| Tipo                  | Diesel, inyección directa    |
| Alimentación          | Presión atmosférica          |
| Desplazamiento        | 997 cc                       |
| Configuración         | 2 Cilindros 4 Ciclos         |
| Diámetro X carrera    | 92 X 75 (mm)                 |
| rpm                   | 900                          |

Cuando el motor estaba trabajando en óptimas condiciones, se realizaron las pruebas. Se alimentó al motor con biodiesel de palma africana, en una mezcla al 20%, y se mantuvo una aceleración constante logrando un régimen de 1800 rpm, bajo esas condiciones, con régimen específico, se fue aplicando la carga con un freno hidráulico, para forzar a trabajar al motor bajo diferentes potencias, ver tabla 3.14.

**Tabla 3.14** Motor Hatz, trabajando a régimen constante.

| <b>Modo</b>     | <b>Régimen rpm</b> | <b>Par deseado</b> | <b>Par real</b> |
|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 1               | 1805               | 17.5               | 17.39           |
| 1               | 1820               | 17.5               | 18.11           |
| 1               | 1812               | 17.5               | 17.69           |
| <b>Promedio</b> | 1812               |                    | 17.73           |
| 2               | 1815               | 25.00              | 25.2            |
| 2               | 1802               | 25.00              | 25.6            |
| 2               | 1820               | 25.00              | 25.05           |
| <b>Promedio</b> | 1812               |                    | 25.28           |
| 3               | 1811               | 32                 | 32.01           |
| 3               | 1791               | 32                 | 32.1            |
| 3               | 1824               | 32                 | 31.69           |
| <b>Promedio</b> | 1809               |                    | 31.93           |
| 4               | 1787               | 40.00              | 41.5            |
| 4               | 1790               | 40.00              | 41.25           |
| 4               | 1815               | 40.00              | 40.9            |
| <b>Promedio</b> | 1797               |                    | 41.217          |

Para medir el flujo másico de combustible, se utilizó una balanza electrónica de alta resolución, la cual calcula la cantidad de combustible consumido por el motor en un intervalo de tiempo característico, precisión de 0.1 g, ver Figura 3.26.



**Figura 3.26** Medidor gravimétrico de flujo de combustible.

Para medir el flujo másico de aire que consumía el motor durante las corridas se empleó un sensor de hilo caliente Thermal TA2 Mass Flow, ver figura 3.27, como se muestra en la descripción ver tabla 3.15.



**Figura 3.27** Medidor de flujo de aire Thermal TA2



**Tabla 3.15** Características del medidor de flujo de aire.

| <b>Parámetro</b>         | <b>Intervalo de medición</b>   |
|--------------------------|--|
| Rango de flujo máximo    | 0.05 a 200Nm/s de velocidad de aire a condiciones estándar           |
| Rango de flujo mínimo    | 0.05 a 2.5Nm/s de velocidad de aire a condiciones estándar<br>100psi |
| Presión de trabajo       | 100psi (680kPa)  |
| Precisión                | +/- 1% de la lectura   |
| Repetibilidad            | +/- 0.5% de la lectura   |
| Efecto de la temperatura | +/- 0.04% por cada °C  |
| Temperatura de trabajo   | 40 a 70°C  |
| Salida análoga           | 4 a 20 mA  |
| Tiempo de respuesta      | 1 a 2 segundos   |

Se tomaron lecturas de temperatura con aproximadamente 15 termopares que van conectados a una tarjeta de adquisición de datos para registrar diferentes temperaturas que se tienen en el motor como:

- Temp. entrada de aire
- Temp. después del compresor
- Temp. gases de escape antes de la turbina
- Temp. gases de escape después de la turbina
- Temp. agua entrada del motor
- Temp. agua salida del motor
- Temp. del intercambiador
- Temp. aceite del motor
- Temp. freno magnético
- Temp. combustible
- Temp. ambiente

### 3.4.2 Programa de control y adquisición de datos

TONE: Programa diseñado por el Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados GIMEL, Universidad de Antioquia, para el control del motor, freno y adquisición de datos de la instrumentación instalada en la celda.

### 3.4.3 Equipos para medir emisiones

#### Mediciones de NO<sub>x</sub>

Portátil horiba EXA 240cl por quimioluminiscencia en caliente ver figura 3.28. Este equipo también proporciona la lectura de oxígeno (O<sub>2</sub>), presente en la corriente de escape utilizando para ello una celda electroquímica. Principio de quimioluminiscencia en caliente. Por medio de sálica gel, conectada con una bomba de succión, el equipo absorbe oxígeno del ambiente, el cual se transforma en ozono, para reaccionar con el NO producido por los gases de combustión, formando NO<sub>2</sub> en estado excitado, estado de poca estabilidad, el cual al regresar a su configuración normal desprende cierta cantidad de energía proporcional a la cantidad de NO que reaccionó durante el proceso en la tabla 3.16 se observan las características del equipo.



**Figura 3.28** Medidor portátil de NO<sub>x</sub> EXA 240CL

**Tabla 3.16** Características técnicas del medidor de NOx.

| Parámetro               | Intervalo de medición          |
|-------------------------|--------------------------------|
| Rango de medida         | 0-2500ppm                      |
| Temperatura de trabajo  | 5 a 45°C                       |
| Tiempo de respuesta     | T90 30 segundos                |
| Linealidad              | +/- 2% de la escala completa   |
| Ruido                   | +/- 1% de la escala completa   |
| Reproducibilidad        | +/- 0.5% de la escala completa |
| Tiempo de calentamiento | 30min                          |
| Salida análoga          | 0-1 V                          |

Con las variables que arroja el equipo, antes mencionado, se calculan o se usan en forma directa para calcular: monóxido, dióxido de carbono, (CO y CO<sub>2</sub>), revoluciones del motor, temperatura del aceite del motor, ángulo de avance de inyección.

Se utiliza el equipo VL Dicom 4000

Las medidas de CO y CO<sub>2</sub>, se efectúan por métodos infrarrojos y las de O<sub>2</sub> y NO se llevan a cabo por métodos electroquímicos ver figura 3.29. y en la tabla 3.17.



**Figura 3.29** Medidor AVL Dicom 400

**Tabla 3.17** Características técnicas del AVL Dicom 400.

| Parámetros de medición      | Unidad de medida       | Rango de medida | Resolución  |
|-----------------------------|------------------------|-----------------|-------------|
| Régimen de giro             | rpm                    | 250 a 800       | 10          |
| Temperatura de aceite       | °C                     | 1 a 120         | 1           |
| CO                          | % en volumen           | 0 a 10          | 0.01        |
| CO <sub>2</sub>             | % en volumen           | 0 a 20          | 0.1         |
| HC                          | ppm en vol.            | 0 a 20000       | 1           |
| O <sub>2</sub>              | % en volumen           | 0 a 4<br>4 a 22 | 0.01<br>0.1 |
| NO                          | ppm en volumen         | 0 a 9000        | 1           |
| Ángulo de avance de chispa* | ° del eje del cigüeñal | -10 a 100       | 0.1         |

\*con respecto al punto muerto superior

Para medir los hidrocarburos totales, se utilizó un equipo que funciona basado en el principio de detección por ionización de llama (FID por sus siglas en inglés) como se muestra en la figura 3.30, y que permite reportar la medida bien sea en base hexano o en base propano, en la tabla 3.18 se muestran las características del equipo.



**Figura 3.30** Medidor de THC por ionización de llama.



**Tabla 3.18** Características del medidor de THC por ionización de llama

| <b>Parámetro</b>         | <b>Rango de medida</b>                                   |
|--------------------------|--|
| Unidad de medida         | ppm, mg/m <sup>3</sup> , g/m <sup>3</sup> , %volumétrico |
| Linealidad               | <4% por encima del rango de medición                     |
| Tipo de salida           | 4 a 20 mA  |
| Rango de medida          | 0.5 a 100.000mg/m <sup>3</sup> de carbono orgánico       |
| Límite de detección      | <0.01 mg/m <sup>3</sup> de carbono orgánico              |
| Temperatura de catálisis | 400°C  |
| Consumo de gas           | <80 mL/min de hidrógeno calidad 5.0                      |

Se realizaron corridas con régimen constante como se muestra en la Tabla 3.19, trabajando con B20, se tomaron 3 medidas de cada modo, con el propósito de darle repetibilidad. En la tabla 3.19 se muestra el resultado de las mediciones del motor diesel HATZ, motor sin turbo, con un par máximo de 50 Nm, se muestra el comportamiento del motor, trabajando con un régimen constante, con la finalidad de mantener las mismas r.p.m., se tuvo un régimen de comportamiento estable, operando a diferentes cargas, con poca variación entre cada repetición, se observa un aumento en el consumo de aire del motor, debido a que el proceso de combustión está demandando más aire, porque la demanda de potencia así lo requiere.



**Tabla 3.19** Resultado de corridas del motor Hatz

| Modo     | Régimen rpm | % Carga | Par deseado Nm | Par real Nm | Comb mg/s | Aire Nm <sup>3</sup> /h | T escp. °C | T acei. °C | Opac % | NOx ppm | CO %Vol | CO <sub>2</sub> %Vol | O <sub>2</sub> %Vol | HC ppm | Lam 0 |
|----------|-------------|---------|----------------|-------------|-----------|-------------------------|------------|------------|--------|---------|---------|----------------------|---------------------|--------|-------|
| 1        | 1805        | 35%     | 17.5           | 17.39       | 228       | 123.10                  | 197.26     | 79         | 0      | 463     | 0.07    | 3.4                  | 16.1                | 33     | 4.25  |
| 1        | 1820        | 35%     |                | 18.11       | 219       | 120.13                  | 179.27     | 83         | 0      | 475     | 0.07    | 3.8                  | 15.7                | 39     | 4     |
| 1        | 1812        | 35%     |                | 17.69       | 216       | 120.08                  | 191.46     | 98         | 0      | 448     | 0.06    | 3.7                  | 15.7                | 38     | 4     |
| Promedio | 1812        |         |                | 17.73       | 221       | 120.08                  | 191.46     | 87         | 0      | 462     | 0.06    | 3.7                  | 15.7                | 37     | 4     |
| 2        | 1815        | 50%     | 25.00          | 25.2        | 315       | 106.24                  | 254.8      | 93         | 0      | 784     | 0.05    | 5                    | 13.9                | 47     | 2.9   |
| 2        | 1802        | 50%     |                | 25.6        | 298       | 107.12                  | 252.5      | 93         | 0      | 774     | 0.06    | 5.1                  | 13.9                | 49     | 2.89  |
| 2        | 1820        | 50%     |                | 25.05       | 290       | 110.51                  | 251.5      | 106        | 0      | 890     | 0.06    | 5.3                  | 13.5                | 31     | 2.77  |
| Promedio | 1812        |         |                | 25.283      | 301       | 107.957                 | 252.93     | 97         | 0      | 816     | 0.06    | 5.13                 | 13.8                | 42     | 2.85  |
| 3        | 1811        | 65%     | 32             | 32.01       | 348       | 115.08                  | 310        | 104        | 0      | 1061    | 0.1     | 6.6                  | 11.6                | 45     | 2.21  |
| 3        | 1791        | 65%     |                | 32.1        | 345       | 109.66                  | 307        | 104        | 0      | 1326    | 0.12    | 6.8                  | 11.2                | 59     | 2.12  |
| 3        | 1824        | 65%     |                | 31.69       | 356       | 114.41                  | 313.56     | 114        | 0      | 1133    | 0.09    | 6.5                  | 11.7                | 44     | 2.24  |
| Promedio | 1809        |         |                | 31.933      | 349.7     | 113.05                  | 310.19     | 107        | 0      | 1173    | 0.1     | 6.63                 | 11.5                | 49     | 2.19  |
| 4        | 1787        | 80%     | 40.00          | 41.5        | 487       | 118.87                  | 242.69     | 111        | 0.9    | 1485    | 0.52    | 9                    | 7.9                 | 63     | 1.56  |
| 4        | 1790        | 80%     |                | 41.25       | 482       | 119.32                  | 422.11     | 112        | 0.2    | 1478    | 0.52    | 8.9                  | 8                   | 64     | 1.56  |
| 4        | 1815        | 80%     |                | 40.9        | 488       | 115.42                  | 424        | 114        | 0.4    | 1526    | 0.47    | 8.9                  | 8                   | 72     | 1.57  |
| Promedio | 1797        |         |                | 41.217      | 485.7     | 117.87                  | 362.93     | 112        | 0.5    | 1496    | 0.5     | 8.93                 | 7.97                | 66     | 1.56  |



## Conclusiones y recomendaciones

- El uso de un simulador para la recreación de combustión utilizando mezclas diesel-biodiesel de higuierilla, con una composición de metil ésteres determinada, proporcionó información importante para el proceso de combustión, considerando al biodiesel como combustible, esto permitió:
  - a) Determinar el poder calorífico del biodiesel y sus mezclas con diesel, considerando una composición más apegada a la realidad, y contar con información confiable que además, ayuda a comprender sus efectos en relación al funcionamiento y operación del motor.
  - b) Estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la combustión del diesel, biodiesel y mezclas, en donde se confirma a través de los resultados, la disminución de tales emisiones que implica la sustitución del diesel por biodiesel. Sin embargo, a primera vista puede no parecer una disminución sustancial, pero no hay que olvidar que el biodiesel al provenir de fuentes renovables como es la biomasa, deja de aportar a la atmósfera una gran fracción del CO<sub>2</sub> que fue utilizado por las plantas oleaginosas para su desarrollo, completando de esta manera el ciclo de carbono.
  - c) Estimar los poderes caloríficos de cada uno de los metil ésteres que componen el biodiesel de higuierilla, además del diesel y de los distintas mezclas combustibles B5, B10, B20, B50, B100, mostrando que la combustión de B100 emite menos CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.
- El banco de pruebas para el motor diesel, se construyó en una estructura móvil con la instrumentación básica para su operación. Se operó con diferentes mezclas, de acuerdo con las condiciones simuladas y actualmente se encuentra operando con B20 en óptimas condiciones en el laboratorio de biocombustibles.
- Las condiciones necesarias para operar un motor de ignición por compresión, dependen del porcentaje de mezcla diesel-biodiesel, así como los elastómeros, empaques y piezas metálicas, con los que interactúa el combustible en el



sistema de alimentación. Considerando tales antecedentes, se hicieron una serie de pruebas de carácter cualitativo de los materiales que estaban en contacto con los combustibles, para determinar si se presentaba algún efecto sobre los mismos.

- Los materiales afectados por el uso de biodiesel, fueron los empaques que se encuentran entre la cabeza del motor y el block, la manguera de alimentación del sistema y los empaques de la bomba de alta presión. La manguera que estuvo expuesta al combustible B5 demostró un mejor comportamiento durante las pruebas de inmersión aceleradas, la cual estuvo expuesta a una temperatura de 75 °C, mientras que en la mezcla B20 se obtuvo el resultado menos deseado. Los resultados anteriores se obtuvieron al realizar un pruebas mecánicas de esfuerzo-deformación.
- De la semilla de higuera cultivada en el Valle de Mexicali, se extrajo aceite de dos tipos de semillas, regular y modificada, proporcionadas por INIPAF, México. Se realizó una extracción con hexano, con el método Soxhlet y se obtuvo un 34.35% en peso de aceite para semilla regular y para semilla modificada de 46.34%.
- De las pruebas preliminares de extracción mecánica en frío, realizadas con semilla regular, se concluyó que son críticas las condiciones de operación de la prensa entre las que destacan velocidad de giro de tornillo de prensado, temperatura y diámetro de la boquilla, de acuerdo a esto se realizó un diseño de experimentos para encontrar las condiciones ideales de operación.
- Se obtuvo biodiesel de jatropha, en el Laboratorio de Procesos Físicoquímicos de la Universidad de Antioquia, Colombia, con la siguiente composición determinada por cromatografía del % en peso de diferentes ésteres: palmítico 13.57, esteárico 7.38, oleico 44.77, linoleico 30.62, entre otros, que indica que



tales componentes conforman la mayor proporción del biodiesel obtenido y determinan las propiedades del mismo y su comportamiento como combustible.

- Las pruebas de índice de acidez, generaron un valor de presenta un índice de peróxido de 248.1 miliequivalentes de oxígeno activo, contenidos en un kilogramo de masa, 124.09 masa mol/kg, con EP1 de 106 mV en un tiempo de 121.1 s, utilizando el equipo 848 Titrino plus. El procedimiento fue de la norma ASTM D664—09 utilizando el método a para el cálculo del número de acidez.
- Utilizando la mezcla B20, de este biodiesel obtenido a partir de aceite de jatropha, y operando el motor Hatz, diesel de 2 pistones, a régimen constante de 1800 rpm y con una carga de 31 Nm, se midieron emisiones, potencia, flujo de aire en el múltiple de admisión, consumo de combustible, temperatura y presión, dando como resultado en promedio un consumo de combustible 349.7 mg/s, aire 113.05 Nm<sup>3</sup>/h, emitiendo 0.1% vol de CO, 6.63 %vol de CO<sub>2</sub> y 11.5 %vol de O<sub>2</sub>, valores de emisiones menores que las generadas por la combustión del diesel.
- Es recomendable, continuar operando el motor prototipo, con las diferentes mezclas de biodiesel producido con materias primas de Baja California, a efecto de evaluar la operación del motor.
- Se recomienda asimismo, instrumentar el motor, de la manera más económica y confiable posible, que permita llevar a cabo mediciones de otros parámetros como potencia, rpm, temperaturas, presiones de entrada y salida, presión dentro de la cámara de combustión, ángulo de giro de cigüeñal, consumo de aire y combustible, y emisiones.
- Se presenta como un área de oportunidad, la utilización de la denominada instrumentación virtual, que en conjunto con indicadores de uso común, seguirá para registrar los parámetros de la operación del motor, a través de señales eléctricas y de manera digital y continua.



- El desarrollo de este tipo de tecnologías de instrumentación virtual, aplicadas a la medición de variables de operación de un motor de diesel que opera con mezclas diesel-biodiesel, permitirá adaptar sistemas para una gran variedad de motores, en diferentes condiciones de operación.
- Es recomendable, continuar con la experimentación de la obtención de aceite de semillas oleaginosas, utilizando el prensado mecánico en frío, a fin de determinar las condiciones más adecuadas para efectuar tal operación, dado que cada vez existe mayor disponibilidad de oleaginosas, no comestibles, en Baja California, de las cuales, no se ha determinado su contenido de aceite, pero cuyo contenido energético es de aproximadamente 30 MJ/kg de aceite, lo cual resulta atractivo para su utilización como materia prima, base de biocombustibles.



## 5. Referencias

- Agudelo AF. Diagnóstico termodinámico de un motor diesel de inyección directa **funcionando** con ésteres metílicos de aceites vegetales. Trabajo de grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- ASTM (American Society for Testing Materials, US). 2003.
- Bear, Adrian. 2008. Escrito
- Canacki M, Gerpen V. 2001. "Biodiesel Production from Oils and Fats with High Free Fatty Acids." American Society of Agricultural Engineers 1429.
- Canakci M, Gerpen J V. 1999. Biodiesel Production Via Acid Catalysis. American Society of Agricultural Engineers 42:1203-1212.
- Carlson EC. 1996. Don't Gamble With Physical Properties for Simulations. Aspen Technology, Inc. CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS.
- Ching T. Hou and Jei-Fu Shaw. 2008. Biocatalysis and Bioenergy. WILEY. A JOHN WILEY AND SONS, INC., PUBLICATION
- Consulta en línea <http://www.iea.org/>
- Coronado M, Montero G, Leyva García O, Vázquez A, estudiante del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería en el Instituto de Ingeniería. Instituto de Investigaciones Sociales. Escuela de Ingeniería y Negocios. Universidad Autónoma de Baja California. Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, CP 21280, Mexicali, BC-México.
- Edited by Ching T. Hou and Jei-Fu Shaw. Biocatalysis and Bioenergy. Copyright © 2008 John Wiley & Sons, Inc.
- Gerhard K, Jon VG, Jürgen K. 2005. The Biodiesel Handbook.
- Hamasaki K, Kinoshita E, Tajima H, Takasaki K, Morita D. 2001. Combustion Characteristic of Diesel Engines with Waste Vegetable Oil Methyl Ester. The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in International Combustion Engines.
- Heywood J. 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, New York



- K. Shaine Tyson, National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard Golden, CO 80401-3393, A national laboratory of the U.S. Department of Energy. Operated by Midwest Research Institute•Battelle•Bechtel Under Contract. No. DE-AC36-99-GO10337. Prepared under Task No. BFP18101. September 2001
- Kubota. October 1985. WORKSHOP MANUAL DIESEL ENGINE KUBOTA Z400-B. Z430-B. D600-B. D640-B V800-B.
- Lujan J M, Tormos B, Salvador F J, Gargar K. Comparative Analysis of the Diesel Engine Filled with Biodiesel Blends During the European MVEG-A cycle: Preliminary study (I). CMT- Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia; Valencia, Spain.
- Refaat A. 2010. Biodiesel Production Using Solid Metal Oxide Catalysts. Int. J. Environ. Sci. Tech. 8:203-221.
- Schmidt, Van Gerpen J. 1996. The Effect of Biodiesel Fuel Composition on Diesel Combustion and Emissions. SAE paper N° 961086.
- SENER, Secretaría de Energía. 2009. Balance Nacional de Energía 2009.
- Starbuck Jon, Harper, Gavin D J. 2009. Run Your Diesel Vehicle on Biofuels.
- Van Gerpen J, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements, G. Knothe. 2004. Biodiesel Analytical Methods. August 2002-January 2004. NREL National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-510-36240, Department of Energy, USA
- Van Gerpen John, Knothe Gerhard, Krahl Jurgen. 2005. The Biodiesel Handbook. AOOS PRESS, Champaign Illinois.
- Vyas A, Verma J, Subrahmanyam N. 2010. A Review on FAME Production Processes. Fuel 89:1-9. doi:10.1016/j.fuel.2009.08.014
- Zuk Miriam, Tzintzun Cervantes María Guadalupe, Rojas Bracho Leonora. 2005. Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. SMARNAT, INE.
- Zuk Miriam, Tzintzun Cervantes María Guadalupe, Rojas Bracho, Leonora. mayo 2007. Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología.



## 6. Anexos

### 6.1 Producción académica y participación en eventos.

# BIODIESEL – QUALITY, EMISSIONS AND BY-PRODUCTS

Edited by **Gisela Montero**  
and **Margarita Stoytcheva**

**Biodiesel – Quality, Emisiones and By-Products**

Edited by Gisela Montero and Margarita Stoytcheva

**Published by InTech**

Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia

#### **Copyright © 2011 InTech**

All chapters are Open Access distributed under the Creative Commons Attribution 3.0 license, which allows users to download, copy and build upon published articles even for commercial purposes, as long as the author and publisher are properly credited, which ensures maximum dissemination and a wider impact of our publications. After this work has been published by InTech, authors have the right to republish it, in whole or part, in any publication of which they are the author, and to make other personal use of the work. Any republication, referencing or personal use of the work must explicitly identify the original source.

As for readers, this license allows users to download, copy and build upon published chapters even for commercial purposes, as long as the author and publisher are properly credited, which ensures maximum dissemination and a wider impact of our publications.

#### **Notice**

Statements and opinions expressed in the chapters are these of the individual contributors and not necessarily those of the editors or publisher. No responsibility is accepted for the accuracy of information contained in the published chapters. The publisher assumes no responsibility for any damage or injury to persons or property arising out of the use of any materials, instructions, methods or ideas contained in the book.

**Publishing Process Manager** Danijela Duric

**Technical Editor** Teodora Smiljanic

**Cover Designer** Jan Hyrat

**Image Copyright** Jon Nightingale, 2011. Used under license from Shutterstock.com

First published November, 2011

Printed in Croatia

A free online edition of this book is available at [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

Additional hard copies can be obtained from [orders@intechweb.org](mailto:orders@intechweb.org)

Biodiesel – Quality, Emissions and By-Products,

Edited by Gisela Montero and Margarita Stoytcheva

p. cm.

ISBN 978-953-307-784-0



## Current Status of Biodiesel Production in Baja California, Mexico

Gisela Montero<sup>1</sup>, Margarita Stoytcheva<sup>1</sup>, Conrado García<sup>1</sup>,  
Marcos Coronado<sup>1</sup>, Lydia Toscano<sup>1,3</sup>, Héctor Campbell<sup>1</sup>,  
Armando Pérez<sup>1</sup> and Ana Vázquez<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Engineering, UABC*

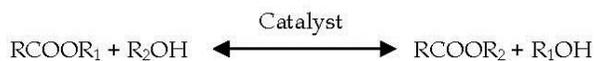
<sup>2</sup>*School of Engineering and Business, Guadalupe Victoria, UABC*

<sup>3</sup>*Technological Institute of Mexicali  
Mexico*

### 1. Introduction

As a result of declining oil reserves in the world, the rise in fossil fuel prices and growing interest in the environment, there is considerable demand for alternative fuels. Biodiesel is recognized like the "green fuel" and has several advantages compared to diesel. It is safe, renewable, nontoxic, and biodegradable (98% biodegradable in a few weeks). Contains less sulfur compounds, and has a high-flash point (> 130°C). Biodiesel could replace diesel and can be used in any compression ignition engine without modification techniques (Leung et al., 2010). It is an alternative biofuel which has a positive energy balance in their life cycle. In terms of effective use of fossil energy resources, biodiesel yields around 3.2 units of fuel product energy for every unit of fossil energy consumed in the life cycle. By contrast, petroleum diesel's life cycle yields only 0.83 units of fuel product energy per unit of fossil energy consumed (Kiss et al., 2006).

Chemically, biodiesel is a mixture of methyl esters of long chain fatty acids and is formed from vegetable oils, animal fats or waste oils and fats through transesterification in the presence of a catalyst (Ma & Hanna, 1999). A general equation for the transesterification (where R is the remainder of the molecule of triglyceride, fatty acid R<sub>1</sub> and R<sub>2</sub> is the length of acyl acceptor) is:



### 2. Regulations on biofuels in Mexico

The government of Mexico initiated a series of measures to create an internal market for biofuels in order to increase efficiency levels in end-use energy and to reduce greenhouse emissions gases. On August 22<sup>nd</sup>, 2005 was published the Law of sugarcane sustainable development, which contain guidelines for the use of sugarcane as energetic.

In early 2007, the Mexican Congress promulgated the Law of Promotion and Development of Bioenergetics, which came into force on February 1<sup>st</sup>, 2008. Its purpose was the promotion and development of bioenergetics in the Mexican agriculture without jeopardizing food



security and sovereignty of the country and to ensure the reduction of pollutant emissions to the atmosphere and greenhouse gases, considering international instruments contained in the treaties that Mexico has signed.

The biofuels development in Mexico according to the law and studies of Secretaría de Energía (Secretariat of Energy) starts from two raw materials with high levels of production in the country (sugarcane and corn yellow). In Article 11 of this Law Section VIII, it is stated the granting of permits for the production of biofuels from corn by the Secretariat of Agriculture, Livestock, Rural Development, Fisheries and Food, as long as there is overproduction.

Along with the development of legislation, Mexico undertook a project to determine the feasibility of liquid biofuels called “Potential and Feasibility of using Biodiesel and Bioethanol in Mexico Transport Sector” where the test result indicates that economic production of ethanol from sugarcane or corn is suitable as long as the ethanol price is between 0.55 and 0.65 U.S. dollars. The inputs considered in this study were sugarcane, maize, cassava, sorghum and sugar beet. In the case of sugarcane, it was analyzed the production of ethanol from sugarcane bagasse.

In this project, it was assessed the production of biodiesel from rapeseed, soya, jatropha, sunflower and safflower oils, and the use of animal fat and waste vegetable oil. The results suggest that farm input costs represent between 59% and 91% of biodiesel production costs and, as a result, animal tallow and waste vegetable oil are an opportunity for biofuels production (SENER, 2006b).

As for biofuels commercialization in Mexico the first steps were taken in 2009 when Secretaría de Energía (Secretariat of Energy) gave the first 12 permits of anhydrous ethanol commercialization to participate in the tender that Petróleos Mexicanos (Mexican Petroleum) issued for the supply of anhydrous ethanol in the metropolitan area of Guadalajara (SENER, 2009).

### 3. Energy situation in Mexico

The primary energy production in Mexico relies mainly on oil and natural gas with a share of 61.5% and 28.2% in 2009 respectively. Renewable energy sources are next in importance, with a contribution of 6.2%, wherein the biomass stands out more than half of that value. The biomass considered by the Secretariat of Energy in the national balance sheet only includes wood and sugarcane bagasse. The remaining 4.1% is made up of coal, nuclear and condensed (see Fig 1).

The entities involved and empowered by the federal government, to ensure and guarantee the energy supply in Mexico are Petróleos Mexicanos (Mexican Petroleum) and Comisión Federal de Electricidad (Federal Electricity Commission).

#### 3.1 Energy situation in Baja California

Baja California is located in the northwestern region of Mexico on a peninsula that bears his name, bordered on the north by the State of California, USA, on the east by the Gulf of California and the west by the Pacific Ocean. It presents dry and warm weather. Its land area is 71,576 km<sup>2</sup> (3.6% of the country) and has a population of 3.3 million inhabitants (3% of the total population of Mexico). Baja California is made up of 5 cities: the capital is Mexicali, Tijuana, Tecate, Ensenada and Playas de Rosarito. The GDP is above the national average. From the economic point of view, it is characterized by a high industrial growth,

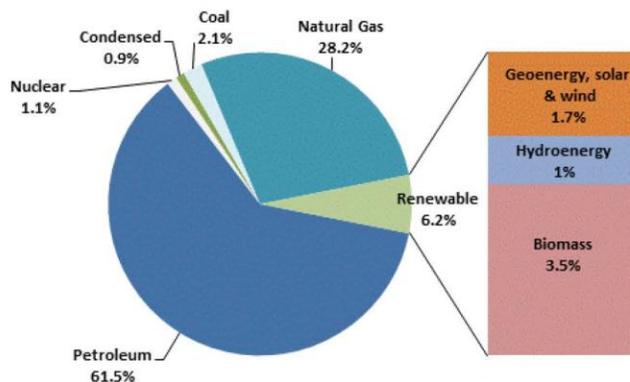


Fig. 1. Structure of primary energy production in México, 2009.

agriculture and livestock. Agriculture and livestock are intensive activities in the region, leading to the generation of large amounts of waste biomass such as animal fats and agricultural residues (wheat straw and cotton waste). Some of them are open burned *in situ*, while others are used in the production of food for livestock.

In the energy situation has primary energy sources for electricity generation, such as geothermal located in Cerro Prieto, with an installed capacity of 720 MW and wind in La Rumorosa located in the municipality of Tecate with an installed capacity of 10 MW. Besides power plants and turbo gas types exist in cities across the state and run with fuel oil and/or natural gas, its total capacity are 1,305 MW and 316 MW respectively. It is appropriate to mention that currently the Baja California's electrical system is isolated from the national grid and interconnected with the United States of America. On the other hand, it has no particular oil resources, so the fuels come the region from southern Mexico and arrive by tanker to Baja California to the Rosarito Beach, situated on the Pacific coast.

In particular may be noted that throughout the year in Mexicali weather conditions are extreme, with temperatures ranging approximately from 0°C to 50°C as shown in Fig. 2, which involve high-energy requirements to ensure physical comfort of its inhabitants.

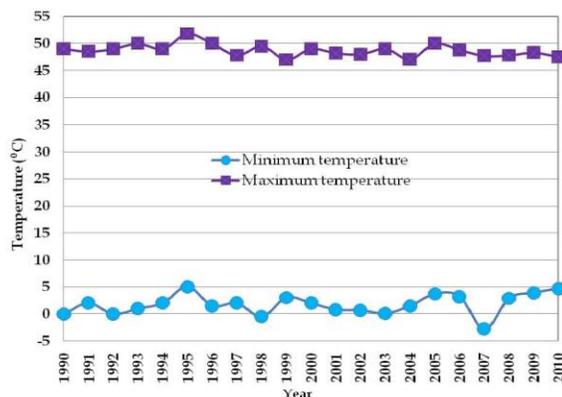


Fig. 2. Minimum and maximum temperatures of Mexicali, 1990-2010.

In 2006, the average per capita consumption of electricity in Mexico was 75% of the world average of 2,659 kWh, while Baja California and Mexicali exceeded it that by 21% and 117% respectively. As shown in Fig. 3, (adapted from Campbell et al., 2011) the annual per capita electricity consumption of Mexicali was comparable to that of Italy and was ranked ahead of countries like Brazil and Chile.

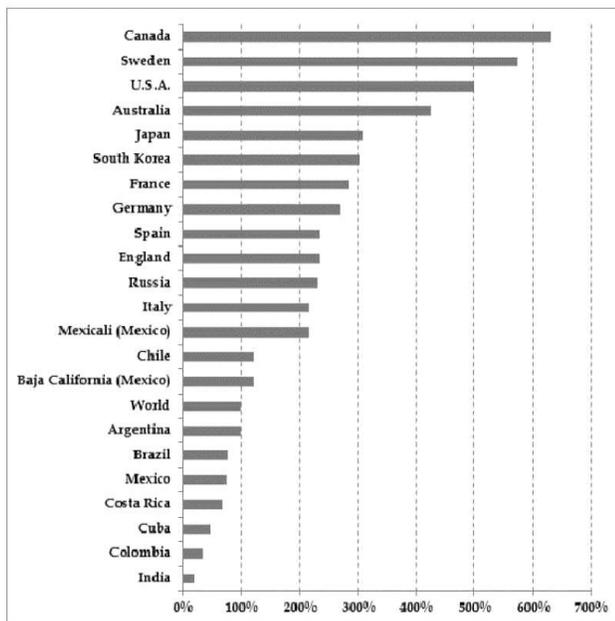


Fig. 3. Relative average annual consumption per capita 2006, World: 2,659 kWh, 100%.

Besides the high-electricity consumption, the fuel requirements of different services sectors should be met which are supplied with fuel from Southern Mexico, as is the case of diesel.

### 3.2 Consumption of diesel in Baja California

Baja California has 3 diesel outlets in the cities of Mexicali, Ensenada and Rosarito Beach catering to other locations in the region. The average sales volume of diesel was 717,211 m<sup>3</sup> in the period 2000-2010, as presented in Fig. 4.

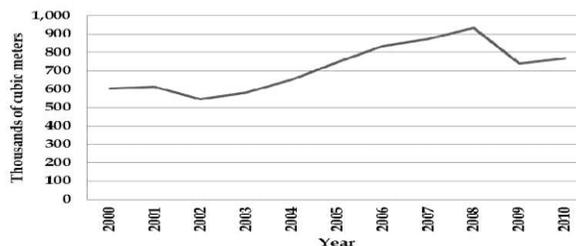


Fig. 4. Diesel sales volume of Baja California, period 2000-2010.

It can be seen that the volumes of diesel are high, and for that reason, it is proposed its replacement with biodiesel obtained from different raw materials available in the state. With respect to biofuels such as biodiesel, currently its production is inexistent in commercial scale, in North Mexico and incipient in the rest of the country, as shown in the map of Fig 5, which presents the current state of production facilities of biodiesel in Mexico. In Baja California are only reported biogas projects. (Adapted from REMBIO, 2011)



Fig. 5. Bioenergy projects in Mexico.

#### 4. Feedstocks availability in Baja California

In order to evaluate the resources available in the state of Baja California for processing and use as biofuels, Biofuels Group of the Institute of Engineering of the Universidad Autónoma de Baja California, started from 2008, a series studies to identify the biomass resources and determine their potential use as feedstock for the production of biofuels. The materials considered were animal fats, waste vegetable oil (WVO), castor oil, *jatropha curcas* and agricultural waste.

##### 4.1 Waste vegetable oil

The Waste Vegetable Oil (WVO) is highly available resource in the state, as well as in the rest of the country, and its amount varies depending on the demand for edible vegetable oil. Its generation is closely linked to the food preparation processes in various sectors: a) the restaurateur, b) food industrial and c) domestic. Traditionally, the WVO has an inadequate disposal and it is directly discharged to the sewage system and illegal dumping. This creates problems of clogging of the sewage system, soil and water pollution and increased maintenance costs and wastewater treatment.

The WVO is that oil that has been altered physical-chemical properties due to its use in a batch or continuous processes of food preparation. Mexican standard NOM-052-SEMARNAT-2005



establishes the characteristics, the procedure of identification, classification and listing of hazardous waste and does not include the WVO as hazardous waste.

The WVO for its high energy content, about 30 MJ/kg (Talens et al., 2006), is likely to be reused as raw material for bioenergy production or other manufacturing processes such as production of soap. Currently a fraction of the WVO generated in Baja California is collected by companies certified from the appropriate authorities, and sell the residues to their end use as food for beef cattle. Other companies choose to export the WVO to the United States, where it is used as feedstock in biodiesel production and eventually that biodiesel is acquired by Mexico for use in vehicles, machinery and equipment of the Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (State Public Services Commission of Tijuana). So then, it is presented a scenario where a valuable resource from the energy standpoint, it is not processed locally, and instead is exported as raw material and imported as a finished product, missing the economic, environmental and social development in the region.

There are several reasons why it is appropriate to promote the development of biodiesel from WVO, among which it can be mention, the following (Canacki & Gerpen, 2001; Gerpen et al., 2006):

- Represents a sustainable method where is revalued and reused a resource with a high-energy content, to produce a cleaner fuel. This will no longer discard a valuable resource from the energy standpoint, and at the same time is greatly benefited the environment and society in general.
- Avoid the use of edible oil crops in the production of biodiesel, so it does not risk food security because it is the reuse of a waste.
- It is an opportunity to mitigate the environmental impact caused by emissions of greenhouse gases responsible of global warming.
- It is an opportunity to diversify the energy matrix, traditionally based on fossil fuels.
- Reduces dependence on fossil fuels.
- Emissions of carbon dioxide are integrated to the carbon cycle of plants from which oils are extracted.
- It has excellent lubricating properties for the diesel engines motors.
- They come from a renewable resource.
- They are biodegradable.

In 2008, was estimated a generation of 2.1 million liters of WVO in the restaurant sector of Mexicali city, capital of Baja California (Coronado, 2010). The results indicate that the types of foods that have greater participation in this generation are: fast food, international food, mexican and china food.

The Fig. 6 shows that 100% of oil used in food preparation 41% is consumed in food or disposed of in cookware, while the remaining 59% becomes WVO. Also, shows that 59% of WVO has different destinations: 33% are collected by companies engaged in such activity, private collectors 16%, 8% were discharged to municipal sewage system and 2% are donated to be reused in food preparation.

On the other hand, it was realized the spatial distribution of restaurants in Mexicali by using a satellite Geo positioning obtaining the geographic coordinates in UTM Zone 11 N of each food preparation facility and place them on a satellite image that is illustrated in Fig. 7.

Usually there is a greater density of restaurants in commercial areas and main avenues. It was confirmed the existence of a relationship between the density of restaurants with a higher incidence of the problem of clogging in the sewage system of the city, due to the discharge of the WVO.

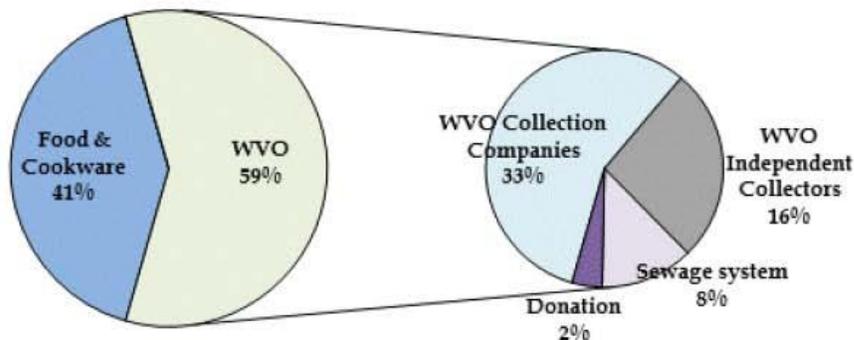


Fig. 6. Waste vegetable oil disposal.



Fig. 7. Spatial distribution of Mexicali restaurants.

Finally, it was performed a dynamic model that helped to predict the WVO generation for a period of 10 years, from 2008 to 2017. The results showed an average generation rate of 3 million liters of WVO, or 3.4 L per capita/ year.

In order to determine the WVO availability of the restaurant industry in Baja California, the results were extrapolated from the survey conducted in Mexicali. The volume of WVO estimated was 8 million liters per year. From this value, it would be feasible to produce 6.4 million liters of biodiesel annually, assuming a conversion efficiency of 80%, obtained experimentally.

#### 4.2 Animal fat

According to the report of the Mexican Service of Information, Food, Agriculture, and Fishery (SIAP, 2009), in 2008 Baja California holds the 6<sup>th</sup> national rank in beef carcass

production. In that year, 695,000 fowls and 259,000 heads of cattle (beef, pigs, goats, and sheep) were processed to produce meat. The number of the standing head of cattle in Baja California in 2008 is shown in Fig. 8.

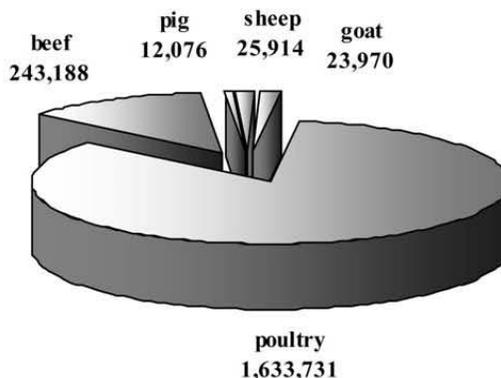


Fig. 8. Standing cattle in Baja California in 2008.

Some portions of the cow mass (49%), of the pig (44%), and of the fowl ((37%) are not suitable for human consumption (Clottey, 1985), so a considerable amount of organic residues are generated by the slaughter processes. Before the rendering process, their average composition is 60% water, 20% proteins/minerals, and 20% fat. These residues could be used to produce biodiesel, due to the fat content. These organic materials with microorganisms potentially pathogens for humans and animals are processed by rendering, which fulfills all of the basic requirements for environmental quality and disease control (Meeker & Hamilton, 2006).

The basic rendering of the materials generated in the beef processing systems is presented in Fig. 9 (Toscano et al., 2011).

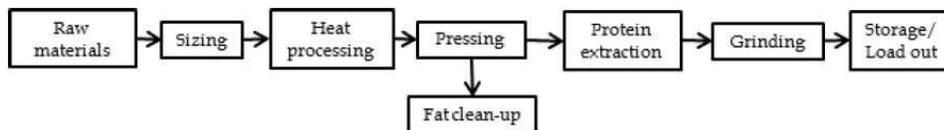


Fig. 9. Scheme of the basic rendering of the materials generated in the beef processing system.

In order to determine the potential of producing biodiesel from yellow grease, it was considered the fat fraction generated in the beef rendering process "in Baja California". The result for 2008 was 1,380 t of fat (Toscano et al., 2011). Assuming conversion efficiency of fat into biodiesel it is stated in 95% (Bhatti et al., 2008), it was estimated that the potential for producing biodiesel in 2008 was 1,311,000 L.

In addition to the residues presented previously, Baja California has oil crops, which represent potential raw material for biodiesel production. Such crops include castor oil plant (*Ricinus communis*) and *jatropha curcas* that are characterized by their high oil content and because it is not edible, so do not compete with food. In the case of the *jatropha curcas*,



experimental plantings were conducted in Mexicali Valley, to determine their adaptation to soil conditions and climate. The results highlighted that the growth of the plant was not successful. However, in the coast of Baja California, south of Ensenada with Mediterranean climate, this plant grows successfully.

The castor oil plant (*Ricinus communis*) is a Baja California endemic plant and has made significant progress in the modernization of such cultivation for mass production in order to obtain oil for its transformation in biodiesel.

Given the raw materials constituted of waste biomass as well as those derived from oilseed plants endemic from Baja California; Institute of Engineering of the Universidad Autónoma de Baja California (Autonomous University of Baja California) is developing research to adapt processes and technologies to achieve the highest conversion yields in the process of biodiesel production. This has been used in different catalytic pathways are described below.

## 5. Transesterification process

The transesterification reaction can be catalyzed by alkalis, acids (Canacki & Gerpen, 1999) or enzymes (Vyas et al., 2010). Several studies have been performed using different oils as raw material, alcohols, as well catalysts, including homogeneous catalysts such as sodium hydroxide, potassium hydroxide and sulfuric acid and heterogeneous catalysts such as lipase (Nielsen et al., 2008), CaO (Lim et al., 2009) and MgO (Refaat, 2010).

### 5.1 Transesterification by acid catalyst

The transesterification process is catalyzed by Bronsted acids, preferably sulfuric and hydrochloric acids. These catalysts show high yields, but the reactions are slow. The molar ratio alcohol/vegetable oil is one of the main factors affecting transesterification. An excess of alcohol promotes the formation of alkyl esters. On the other hand, an excessive amount of alcohol impairs the recovery of glycerol, so the ideal ratio of alcohol/oil must be established empirically, considering each individual process (Demirbas, 2009). It has been observed that the use of an acid catalyst is more effective than an alkaline catalyst when the concentration of free fatty acids is high, above 1%. These reactions require washing, because the acids involved a large amount of salts produced during the reaction which can be corrosive. The mechanism of acid catalyzed transesterification of vegetable oil is shown in Fig. 10, for a monoglyceride. However, this can be extended to di- and triglycerides. Protonation of the ester carbonyl group produces one carbon cation II which after a nucleophilic attack of alcohol causes the tetrahedral intermediate III and removes the glycerol to form the new ester IV and regenerate the catalyst  $H^+$ .

According to the mechanism, carboxylic acids can be formed by the reaction of the carbon cation II when water is present in the reaction mixture. This suggests that transesterification by acid catalyst should be done in the absence of water to avoid the formation of carboxylic acids, which reduces the yield of alkyl esters (Schuchardt et al., 1998).

### 5.2 Transesterification by alkali catalyst

Transesterification of vegetable oils by alkali catalyst proceeds faster than the reaction by acid catalyst. The first step is the reaction of the base with the alcohol, producing an alkoxide and a catalyst protonated. The nucleophilic attack of the alkoxide to the carbonyl group of the triglyceride generates a tetrahedral intermediate from which form the alkyl

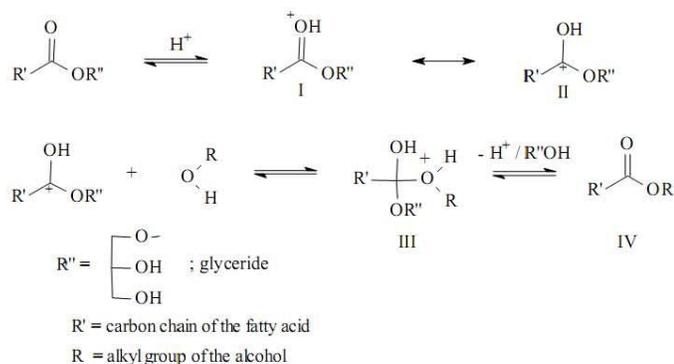


Fig. 10. Mechanism of the acid-catalyzed transesterification of vegetable oils.

ester and the corresponding anion of the diglyceride. Diglycerides and monoglycerides are converted by the same mechanism. The alkali metal alkoxides ( $\text{CH}_3\text{ONa}$  for methanolysis) are the most active catalysts which offer high yields in short reaction times (30 min). However, the reaction requires no water (Demirbas, 2009). The reaction mechanism for catalysis of transesterification is displayed in Fig.11.

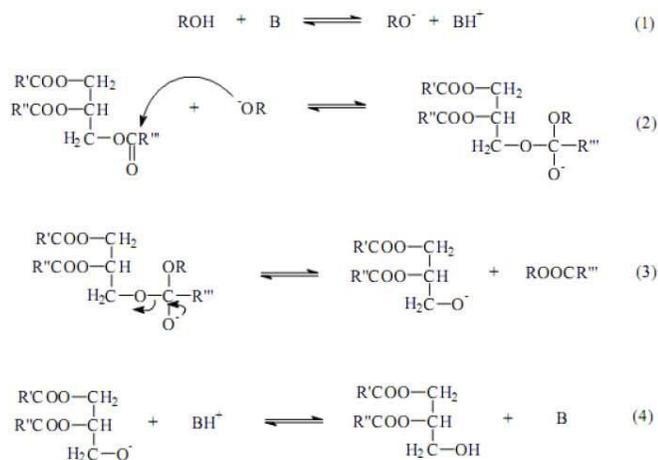


Fig. 11. Mechanism of the base-catalyzed transesterification of vegetable oils.

The transesterification process by alkali catalyst is 100% in the commercial sector, because the chemicals used have proved to be the cheapest for their high level of conversion to esters at low temperature and atmospheric pressure. The main inconvenient of this technology is the sensitivity of alkaline catalysts with the purity of the raw material. The presence of free fatty acids and water in the raw materials has a significant impact on the transesterification reaction (Marchetti et al., 2008). Besides the complex purification of the final products of reaction, this method requires treatment of waste water produced during the process. The amount of wastewater produced is about 200 kg/t of biodiesel produced

which increases the costs of this technology and makes it unfriendly to the environment (Ghaly et al., 2010). Fig. 12 depicts the process of transesterification by alkali catalyst (Bacovsky et al., 2007).

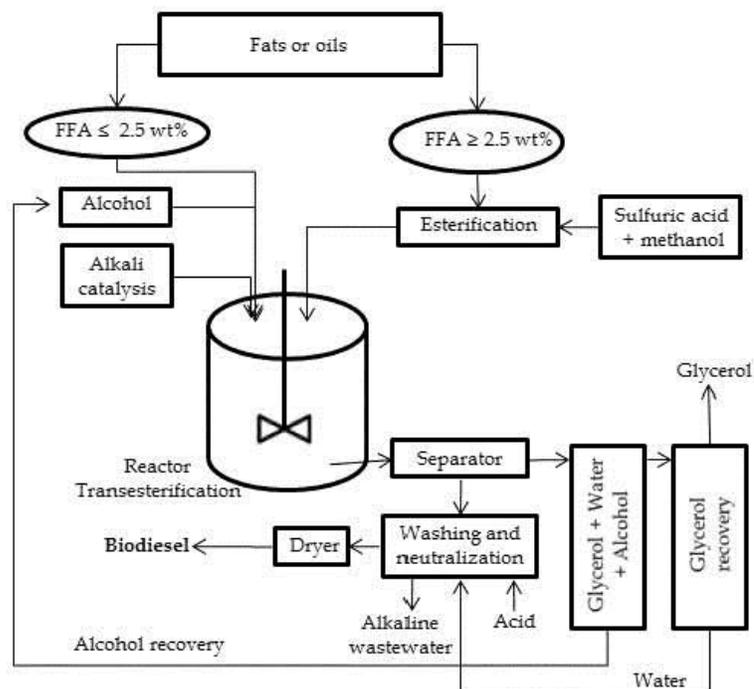


Fig. 12. Process diagram of biodiesel production by alkali catalyst.

### 5.3 Transesterification by enzymatic catalyst

Biological enzymes, including lipases, can be used as catalysts instead of acids or bases. The use of such enzymes in the production of biodiesel has several advantages (Hass et al., 2002):

- Requires little or no heating.
- The presence of free fatty acids (FFA) in the raw material increases performance, without the production of soap, creating a source of opportunities for the use of low-quality raw materials and low cost.
- It works even in the presence of water.
- Required less alcohol and do not produce salts.

A large number of lipases have been explored as catalysts in biodiesel production. Researchers in China have tested a wide variety of lipases, obtaining yields of up to 94%. Italian researchers tested different lipases and found that the lipase produced by *Pseudomonas cepacia* had a yield of 100% in six hours.

Similar studies were performed in the United States (Jin & Bierma, 2010). Unfortunately, lipases and other enzymes tend to be expensive due to the purification process, which increases the costs of biodiesel production (Gerpen et al., 2004).

In order to increase the duration of the activity of lipase, thereby reducing costs, research has been developed in the immobilization of lipases using physical structures to stabilize the enzyme and allow its reuse. Lipases have been covalently attached to activated polyvinyl chloride, nylon or silica gel. They have also been immobilized by entrapment in alginate gels. Adsorption on hydrophobic or hydrophilic media is some of the techniques used to lipase immobilization (Minowska et al., 2005). Although the enzymatic process is not commercially developed, a large number of publications have shown that enzymes are promising catalysts. These studies consist mainly on the optimization of reaction conditions (temperature, ratio alcohol/oil, type of microorganisms that produce lipase, lipase amount, time, etc.) to establish the characteristics of industrial application.

Fig. 13 shows the enzymatic production of biodiesel using immobilized lipase (Du et al., 2008).

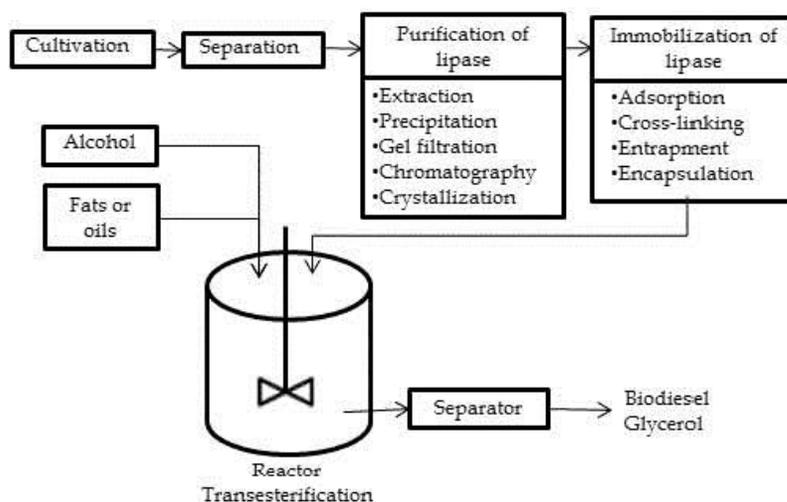


Fig. 13. Enzymatic biodiesel production by immobilized lipase.

Currently in the Institute of Engineering is being developed a project that aims to identify a microorganisms that produces a high yield of lipase, with the necessary characteristics to be used in the synthesis of biodiesel. So it was analyzed the production of lipase from 6 different fungi (*Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus Awamory*, *Trichoderma sp*, *Trichoderma reesei* and *Penicillium chrysogenum*).

The advantage of this methodology is based on the fact that extracellular lipases can be produced in large quantities under standard laboratory conditions. This could be successful by using the appropriate media and the optimal process parameters.

## 6. Economic analysis of biodiesel production from WVO and yellow fat in Mexicali, Baja California

Mexicali has a motor vehicle fleet of diesel estimated at 14,000 units and cargo transport. The transport cargo sector with 11,861 units consumes about 169 million liters of diesel. The diesel used in Baja California comes from southern Mexico and is one of the causes of CO<sub>2</sub> emissions that affect air quality in Mexicali, it is therefore necessary to explore options for



replacing it with biodiesel, which produces less CO<sub>2</sub> and can be obtained from waste material. Thus, in this analysis, was considered the use of waste vegetable oil from the Mexicali restaurant industry as a raw material for the production of 4.78 million liters of biodiesel energy equivalent to 4.45 million liters of diesel.

The environmental benefit involving the replacement of such a volume of diesel with biodiesel is to reduce emissions by about 9,700 t of CO<sub>2</sub>, 22 t of SO<sub>x</sub>, and 11 t of PM<sub>10</sub>.

To determine the economic feasibility of producing biodiesel, were applied the methodologies of net present value and internal rate of return. The results indicate that the production of biodiesel is profitable. However, the recovery time of investment, coupled with the uncertainty presented by the biofuels market, make necessary a policy that implements local tax resources to support the promotion, production and use of biodiesel for the transport sector. Therefore, under the circumstances considered in this analysis, the production of biodiesel is feasible if it is developed synergy among the productive sectors, education and government.

The profitability indicators are set at the discretion of the financial analysis methodology. The final report of economical evaluation of this project is supported with the following results:

- a. The net present value with a bank interest rate of 17%, meets the acceptance criteria to generate 423,747 USD, however, the magnitude of the indicator does not provide the certainty to accept conditions of project implementation.
- b. The internal rate of return is calculated based on cash flow net present value, resulting in the profitability of 23.5%; therefore the project is considered financially viable, however, an acceptance criterion is to get 10 points above the discount rate.
- c. The Benefit/Cost Ratio result is 1.05, therefore, is slightly positive, meets the criteria of acceptance, but does not provide the necessary clearance to run the project within the evaluation period.
- d. The Profitability Index of the project is 0.227, which does not meet the acceptance criteria for the project.

Based on the evidence derived from cost-benefit analysis it may be concluded that carrying out the project to produce biodiesel from WVO in Mexicali is profitable. However, the return time of investment and the uncertainty presented by the biofuels market, make necessary a policy that implements local tax resources to support the promotion, production and use of biodiesel for the transport sector (Vazquez et al., 2011).

## 7. Conclusion

Baja California has significant potential for the development of biodiesel production projects, taking into account residual material such as yellow fat or others that are not currently used as vegetable oils, which are discarded mostly. It has also been encouraged by the government of Mexico the planting of bioenergy crops such as castor and *jatropha curcas*. The promotion for these projects, in areas without oil resources such as Baja California, will slightly shift the use of fossil fuels, and thereby avoid the emission of sulfur compounds.

The current state of biofuel development in Baja California largely reflects the current situation of production, operation and sales of biofuels, including biodiesel, in Mexico.

From an economic standpoint, the production of biodiesel in Baja California will be successful as long as the support from the productive sectors, education and government.



## 8. Acknowledgment

The authors thank to Institute of Engineering of Universidad Autónoma de Baja California, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Secretaría de Educación Pública for their support in the development of the present work.

## 9. References

- Bacovsky, D.; Körbitz, W.; Mittelbach, M. & Wörgetter, M. (2007). Biodiesel production: *Technologies and European providers*, IEA Editor, (2.6.2011), Available from <http://www.biofuels-dubrovnik.org/downloads/Process%20Developers%20Catalogue-2007.07.06.pdf>
- Bhatti, H.; Hanif, M.; Faruq, U. & Sheikh, M. (2008). Acid and base catalyzed transesterification of animal fats to biodiesel. *Iran J Chem Chem Eng*, Vol.27, No.4, (2008).
- Boey, P.; Maniam, G. & Hamid, S. (2009). Biodiesel from adsorbed waste oil on spent bleaching clay using CaO as a heterogeneous catalyst. *European Journal of Scientific Research*, Vol.33, No.2, (July 2009), pp. 347-357 10, ISSN 1450-216X
- Canacki, M. & Gerpen, J. (1999). Biodiesel Production Via Acid Catalysis. *American Society of Agricultural Engineers*, (2.2.2011), Available from [www.asabe.org](http://www.asabe.org)
- Canacki, M. & Gerpen, J., (2001). Biodiesel Production from oils and fats with high free fatty acids. *American Society of Agricultural Engineers* 1429, Vol.44(6), pp. 1429-1436 7, (September 2001), ISSN 0001-2351
- Campbell, H.; Montero, G.; Pérez, C. & Lambert, A. (2011). Efficient energy utilization and environmental issues applied to power planning. *Energy Policy*, Vol.39, No.6, (June 2011), pp. 3630-3637 7, ISSN 0301- 4215
- Clotey S. (1985). *Manual for the slaughter of small ruminants in developing countries*. (30.3.2011), (1985) Available from <http://www.fao.org/docrep/003/X6552E/X6552E00.HTM>
- Coronado, M. (2010). *Estudio de Factibilidad de Producción de Energía a partir de Aceite Vegetal Residual, Caso: Sector Restaurantero*. Master Thesis. Institute of Engineering, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B.C. México.
- Demirbas, A. (2008). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, Vol.50, No.1, (January 2009), pp. 14-34 20, ISSN 0196-8904
- Du, W.; Li, W.; Sun, T.; Chen, X.; Liu, D. (2008). Perspectives for biotechnological production of biodiesel and impacts. *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol.79, No.3, (June 2008), pp. 331-337 6, ISSN 1432-0614
- Gerpen, J.; Pruszko, R.; Clements, D.; Shanks, B. & Knothe, G. (2006). *Building a succesful biodiesel business*, Biodiesel Basics, Second Edition, Biodiesel Basics, ISBN 097863490X
- Gerpen, J.; Shanks, B. & Pruzco, R. (July 2004). *Biodiesel Production Technology*, in NREL/SR-510-36244, M.R.E. Laboratory, Editor. 2004: Boulder, CO, (13.4.2011), Available from <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36244.pdf>
- Hass, M.; Piazza, G. & Foglia, T. (2002). Enzymatic Approaches to the Production of Biodiesel Fuels, in *Lipid Biotechnology*, T.M.K.a.H.W. Gardner, (2002) Marcel Dekker, Inc: New York, pp. 587-598 11, ISBN 9780824706197



- Jin, G. & Bierma, T. (2010). *Whole-cell Biocatalyst for producing Biodiesel from Waste Greases*, in *ISTC Reports*. Illinois State University: Normal, Illinois. (23.4.2011) Available from [http://www.istc.illinois.edu/info/library\\_docs/RR/RR-117.pdf](http://www.istc.illinois.edu/info/library_docs/RR/RR-117.pdf)
- Kiss, A.; Dimian, A. & Rothenberg, G. (2006). Solid Acid Catalysts for Biodiesel Production – Towards Sustainable Energy. *Advanced Synthesis & Catalysis*, Vol.348, No.1-2, (January 2006) pp. 75-81 6. ISSN 1615 4169
- Leung, D.; Wu, X. & Leung, M. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, (7.11.2009), pp. (1083-1095 87). ISSN 0306-2619
- Ma, F.; & Hanna, M. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*. Vol.70, No.1, (October 1999), pp. 1-15. ISSN 09608524
- Marchetti, J.; Miguel, V. & Errazu, A. (2008). Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, Vol.89, No.8, (August 2008), pp. 740-748 8, ISSN 0378-3820
- Meeker, D. & Hamilton, C. (2006). *An overview of the rendering industry*. In: Meeker, D., editor. *Essential rendering: all about the animal by-products industry*. Arlington: National Renderers Association, Available from [http://assets.nationalrenderers.org/essential\\_rendering\\_book.pdf](http://assets.nationalrenderers.org/essential_rendering_book.pdf)
- Minovska, V.; Winkelhausen, E. & Kuzmanova, S. (2005). Lipase immobilized by different techniques on various support materials applied in oil hydrolysis. *J. Serb. Chem. Soc.* Vol.70, No.4, (April 2005), pp. 609-624 15, ISSN 0352-5139
- Nielsen, P.; Brask, J. & Fjerbaek, L. (2008). Enzymatic biodiesel production: Technical and economical considerations. *Eur. J. Lipid Science and Technology*, Vol.110, No.8, (July 2008), pp. 692-7008, ISSN 1438-9312
- Refaat, A. (2010). Biodiesel production using solid metal oxide catalysts. *Int. J. Environ. Sci. Tech*, Vol.8, No.1, (January 2011), pp. 203-221 18, ISSN 1735-1472
- REMBIO, Red Mexicana de Bioenergía. (2011). *Mapa Proyectos Bioenergía*, <http://www.rembio.org.mx/MapaProyectosBioenergía>.
- SENER, Secretaría de Energía. (2009). *Se otorgan los primeros 12 permisos de comercialización de bioenergéticos*, *Boletín de prensa no. 51*, (18.3.2011) Available from <http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/Default.aspx?id=1071>
- SENER, Secretaría de Energía. (2006b). *Potencialidades y viabilidad del uso del bioetanol y biodiesel para el transporte en México (SENER-BID-GTZ)*, Proyectos ME-T1007 – ATN/DO-9375-ME y PN 04.2148.7-001.00, (2.3.2011), Available from <http://www.sener.mx>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera Resumen Nacional de la Producción Pecuaria. (2009). (24.3.2011), Available from <http://infosiap.siap.gob.mx/ventana.php>
- Talens, L.; Villalba, G. & Gabarrell, X. (2006). Exergy analysis applied to biodiesel production. *Resources Conservation & Recycling*, Vol.51, (August 2007), No.2, pp. 397- 407 10, ISSN 0921- 3449
- Toscano, L.; Montero, G.; Stoytcheva, M.; Campbell, H. & Lambert, A. (2011). Preliminary assessment of biodiesel generation from meat industry residues in Baja California, Mexico, *Biomass and Bioenergy*, Vol.35, No.1, (January 2011), pp. 26-31 5, ISSN 0961- 9534



- Vázquez, A; Montero, G.; Sosa, J.; García, C. & Coronado, M. (2011). Economic Analysis of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil in Mexicali, Baja California, *Energy science and technology*, Vol.1, No.1, (2011), pp. 87-93 6, ISSN 1923-8460
- Vyas, A.; Verma, J. & Subrahmanyam, N. (2010). A review on FAME production processes. *Fuel*, Vol. 89, No. 1, (January 2010), pp. 1-9 8, ISSN 0016-236



Mexicano de la Propiedad Industrial

001334 Recibido 9/11/10



Solicitud de Patente  
 Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad

Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál:  
 Modelo Industrial  Dibujo Industrial

Uso exclusivo Delegaciones y Subdelegaciones de la Secretaría de Economía y Oficinas Regionales del  
**SECRETARIA DE ECONOMIA**  
**RECIBIDO**  
 Folio de entrada  
**OCT 26 2010**  
**RECIBIDO**  
 DELEGACION FEDERAL  
 MEXICALI 3849 10

INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL  
 Dirección Divisinal de Patentes  
 OFICINA REGIONAL DE OCCIDENTE

Solicitud Expediente MX/a/2010/012054  
 Fecha 26/OCT/2010 Hora: 10:16  
 Folio MX/E/2010/068567 224093



Antes de llenar la forma lea las consideraciones generales al reverso

**I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)**

El solicitante es el inventor  El solicitante es el causahabiente

1) Nombre (s): Universidad Autónoma del Estado de Baja California  
 2) Nacionalidad (es): Mexicana  
 3) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: Avenida Álvaro Obregón y Julián Carrillo S/N Colonia Nueva C.P. 21100  
 Población, Estado y País: Mexicali, Baja California, México  
 4) Teléfono (clave): (686)-551-9498 5) Fax (clave):

**II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)**

6) Nombre (s): Conrado García González, Dra. Gisela Montero Alpérez, Armando Pérez Sánchez, Marcos Alberto Coronado Ortega  
 7) Nacionalidad (es): Mexicana  
 8) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: Calle de la Normal y Blvd. Benito Juárez S/N Colonia Insurgentes Este C.P. 21280  
 Población, Estado y País: Mexicali, Baja California, México  
 9) Teléfono (clave): (686) 566 41 50 10) Fax (clave):

**III DATOS DEL (DE LOS) APODERADO(S)**

11) Nombre (s): Dr. Gabriel Estrella Valenzuela, Tomás Rafael Prieto Baumann, Linda Eugenia Arredondo Acosta 12) R G P:  
 13) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: Calle de la Normal y Blvd. Benito Juárez S/N Colonia Insurgentes Este C.P. 21280  
 Población, Estado y País: Mexicali, Baja California, México 14) Teléfono (clave): (686) 566 41 50 15) Fax (clave):  
 16) Personas Autorizadas para oír y recibir notificaciones:

17) Denominación o Título de la Invención: **EXTRACTOR DE ACEITES ESENCIALES**

18) Fecha de divulgación previa  
 Día Mes Año

19) Clasificación Internacional **uso exclusivo del IMPI**

20) Divisinal de la solicitud  
 Número

21) Fecha de presentación  
 Día Mes Año

22) Prioridad Reclamada:  
 País Día Mes Año No. de serie

**Lista de verificación (uso interno)**

| No. Hojas |  | No. Hojas |   |
|-----------|--|-----------|---|
| 1         | Comprobante de pago de la tarifa                     | 8         | Documento de cesión de derechos                       |
| 4         | Descripción y reivindicación (es) de la invención    | +         | Constancia de depósito de material biológico          |
| 1         | Dibujo (s) en su caso                                | +         | Constancia (s) comprobatorio(s) de divulgación previa |
| 1         | Resumen de la descripción de la invención            | +         | Documento (s) de prioridad                            |
| 2         | Documento que acredita la personalidad del apoderado | +         | Traducción  |
|           |  | 55        | TOTAL DE HOJAS  |



|   |  |  |
|---|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Solicitud de Patente<br><input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad<br><br><input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál:<br><input type="checkbox"/> Modelo Industrial <input type="checkbox"/> Dibujo Industrial | Uso exclusivo Delegaciones y Subdelegaciones de la Secretaría de Economía y Oficinas Regionales del<br><b>SECRETARÍA DE ECONOMÍA</b><br>Sello<br><b>RECIBIDO</b><br>Folio de entrada<br><b>JUN 15 2011</b><br>RECIBIDO<br>DELEGACIÓN REGIONAL<br>MEXICALI B.C.<br>2959 | Uso exclusivo del IMPI<br><br>No. de expediente<br><br>No. de folio de entrada<br><br>Fecha y hora de presentación |
|   | Antes de llenar la forma lea las consideraciones generales al reverso  |  |

| I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)  |  |
|--|--|
| El solicitante es el inventor <input type="checkbox"/>   | El solicitante es el causahabiente <input checked="" type="checkbox"/> |
| 1) Nombre (s): <b>Universidad Autónoma de Baja California</b>  |  |
| 2) Nacionalidad (es): Mexicana   |  |
| 3) Domicilio, calle, número, colonia y código postal: <b>Avenida Álvaro Obregón y Julián Carrillo S/N Colonia Nueva C.P. 21100</b> |  |
| Población, Estado y País: <b>Mexicali, Baja California, México</b>   |  |
| 4) Teléfono (clave): <b>(686)- 551-9498</b>  | 5) Fax (clave):  |

| II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)   |                  |
|--|------------------|
| 6) Nombre (s): <b>Ing. Conrado García González, Dra. Gisela Montero Alpírez, M.I. Marcos Alberto Coronado Ortega, Ing. Armando Pérez Sánchez</b> |                  |
| 7) Nacionalidad (es): Mexicana   |                  |
| 8) Domicilio, calle, número, colonia y código postal: <b>Calle de la Normal y Blvd. Benito Juárez S/N Colonia Insurgentes Este C.P.21280</b>     |                  |
| Población, Estado y País: <b>Mexicali, Baja California, México</b>   |                  |
| 9) Teléfono (clave): <b>(686) 566 41 50</b>  | 10) Fax (clave): |

| III DATOS DEL (DE LOS) APODERADO(S)   |                  |              |
|---|------------------|--------------|
| 11) Nombre (s): <b>Tomás Rafael Prieto Baumann</b>  | 12) R G P:       | <b>18840</b> |
| 13) Domicilio, calle, número, colonia y código postal: <b>Calle de la Normal y Blvd. Benito Juárez S/N Colonia Insurgentes Este C.P.21280</b>                 |                  |              |
| Población, Estado y País: <b>Mexicali, Baja California, México</b>  |                  |              |
| 14) Teléfono (clave): <b>(686) 566 41 50</b>  | 15) Fax (clave): |              |
| 16) Personas Autorizadas para oír y recibir notificaciones:<br><b>Tomás Rafael Prieto Baumann, Linda Eugenia Arredondo Acosta</b><br>tomas.prieto@uabc.edu.mx |                  |              |

17) Denominación o Título de la Invención:

**EXTRACTOR HORIZONTAL DE ACEITES ESENCIALES**

|  |   |
|--|---|
| 18) Fecha de divulgación previa<br>Día Mes Año | 19) Clasificación Internacional<br>uso exclusivo del IMPI |
|--|---|

|  |                                      |  |
|--|--------------------------------------|--|
| 20) Divisional de la solicitud<br>Número | Figura jurídica                      | 21) Fecha de presentación<br>Día Mes Año |
| 22) Prioridad Reclamada:<br>País         | Fecha de presentación<br>Día Mes Año | No. de serie                             |

| Lista de verificación (uso interno)   |   |
|---|---|
| No. Hojas   | No. Hojas   |
| <input type="checkbox"/> Comprobante de pago de la tarifa                     | <input type="checkbox"/> Documento de cesión de derechos                      |
| <input type="checkbox"/> Descripción y reivindicación (es) de la invención    | <input type="checkbox"/> Constancia de depósito de material biológico         |
| <input type="checkbox"/> Dibujo (s) en su caso                                | <input type="checkbox"/> Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa |
| <input type="checkbox"/> Resumen de la descripción de la invención            | <input type="checkbox"/> Documento (s) de prioridad                           |
| <input type="checkbox"/> Documento que acredita la personalidad del apoderado | <input type="checkbox"/> Traducción   |
|   | <b>TOTAL DE HOJAS</b>   |

Observaciones:

Bajo protesta de decir verdad, manifiesto que los datos aceptados en esta solicitud son ciertos.

**Tomás Rafael Prieto Baumann**      **Mexicali, Baja California a 25 de mayo de 2011**  
 Nombre y firma del solicitante o del apoderado      Lugar y fecha



# Simulación de la etapa de combustión de un motor diesel que opera con mezclas de diesel-biodiesel

Armando Pérez\*, Gisela Montero, Héctor Campbell, Ramón Bautista, Marcos Coronado, Conrado García

\*email: armand\_perez@hotmail.es

## Resumen

El biodiesel es un combustible producido mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales, que en la actualidad está adquiriendo mayor atención como sustituto del diesel, ya que representa una oportunidad para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM, CO, HC y PAH, además de contribuir en la diversificación de combustibles. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación del ciclo de combustión interna, tomando como referencia un motor KUBOTA D600-B de tres cilindros, que opera con distintas mezclas diesel-biodiesel. Se desarrollaron de manera detallada las condiciones de funcionamiento del equipo utilizando el simulador Aspen®. Las especificaciones del diesel se tomaron de los reportes de PEMEX y SENER y las propiedades del biodiesel se determinaron mediante el simulador Aspen Plus®. Para simular el biodiesel se tomaron como referencia los metilésteres correspondientes a los ácidos grasos que conforman el aceite de higuera (*Ricinus Communis*), planta autóctona de Baja California, México. Las propiedades físicas y químicas, de estos compuestos, fueron definidas por usuario en el simulador. Se consideraron los principales aspectos de las condiciones de operación del motor tales como: relación diesel-biodiesel, mezcla aire/combustible, temperatura de los gases de combustión y carga térmica. Los resultados muestran las emisiones de CO<sub>2</sub>, vapor de agua, eficiencia de combustión, potencia y poder calorífico inferior de los combustibles.

**Palabras clave:** simulación, biodiesel, combustión interna, emisiones.

## Introducción

En los últimos años la producción y consumo de biodiesel a nivel internacional, ha adquirido un mayor auge como resultado de los altos índices de emisiones, el encarecimiento del petróleo y sus derivados, así como la necesidad de impulsar el compromiso con el desarrollo sustentable. La importancia del biodiesel se ha señalado en obras recientes [1-6], como un combustible alternativo para el motor diesel. El biodiesel es una mezcla de metilésteres de ácidos grasos que se obtiene de fuentes renovables, como aceites vegetales o grasas animales, a través de un proceso de transesterificación. La reacción de transesterificación puede ser catalizada por álcalis, ácidos [7,8] o enzimas [9]. Se han realizado varios estudios usando diferentes aceites como materia prima, diferentes alcoholes, al igual que diferentes catalizadores, incluyendo catalizadores homogéneos como el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y ácido sulfúrico; y catalizadores heterogéneos como las lipasas [9-11]. La principal razón por la cual es necesario llevar a cabo este proceso de conversión, de aceites a biodiesel, es reducir su viscosidad, obteniendo propiedades similares a las del diesel. Entre las ventajas principales del biodiesel destacan su origen renovable, biodegradabilidad, menores emisiones de CO<sub>2</sub> y en ocasiones nulas emisiones de SO<sub>x</sub>. Además, presenta buenas características lubricantes y tiene un punto de inflamación superior al del diesel. Por otra parte, se puede encontrar en la literatura la mención de algunos problemas técnicos relacionados con su uso, tales como el aumento de emisiones de NO<sub>x</sub>, problemas de desempeño como son torque, potencia, consumo específico de combustible, y corrosión en el sistema de combustión. Las propiedades que presentan la mayor variación entre biodiesel y diesel son: la densidad, el número de cetano, el poder calorífico y en mayor proporción, la viscosidad del combustible [3,4,12]. Diferentes estudios en el tema, explican la variación de los parámetros de desempeño, por la presencia de



oxígeno en la composición del combustible, la cual incide en la disminución del poder calorífico y con éste, la disponibilidad de energía. Sin embargo, se encuentra que el biodiesel producido a partir de diferentes fuentes (algodón, soya, palma, girasol, etc.) [5, 6], no presenta cambios significativos en su poder calorífico.

El propósito de un motor de combustión interna es la producción de energía mecánica a partir de la energía química almacenada en el combustible. En los motores de combustión interna, la energía se libera mediante el encendido y la oxidación del combustible dentro del motor, a diferencia de los de combustión externa como, por ejemplo, un horno industrial o una caldera. El fluido de trabajo cambia su composición química después de la combustión y es el encargado de transferir el trabajo al pistón y este último al resto de los componentes de la cadena cinemática, hasta llegar finalmente a las ruedas impulsoras del movimiento. Se tomaron una serie de consideraciones relevantes, para simular la etapa del proceso de combustión en Aspen®, utilizando como combustible diesel y biodiesel, así como mezclas de ambas (B5, B10, B20, B50 y B100). Se efectuó la estimación de las emisiones asociadas a la combustión de diesel y sus mezclas diesel-biodiesel. Así mismo, se determinaron las propiedades físico-químicas de un biodiesel que fue definido como componente de usuario, a partir de una mezcla de metilésteres, con el objetivo de simular un combustible lo más apegado a la realidad. Simulaciones desarrolladas previamente en otras investigaciones, solamente han utilizado una molécula representativa del biodiesel.

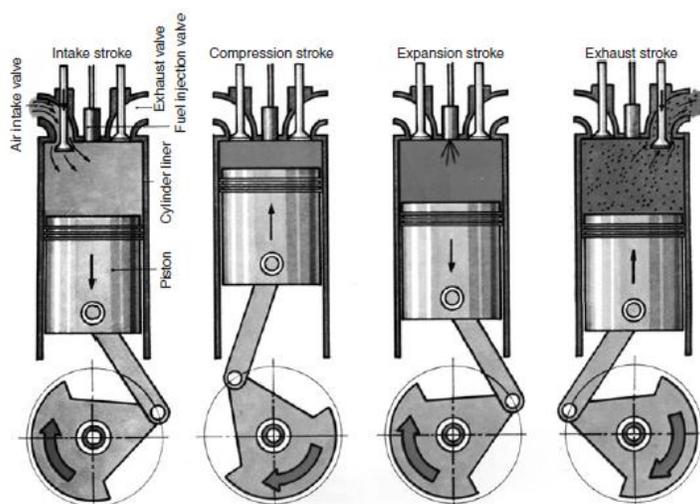
## Castor Oil

La higuera (*Ricinus communis L.*) es una planta oleaginosa que es cultivada de manera intensiva, principalmente para extraer el aceite de la semilla y procesarlo para obtener los metilésteres correspondientes a los ácidos grasos del aceite, esto es biodiesel. Este cultivo no requiere de terrenos fértiles, ya que proliferan en suelos áridos, pobres en nutrientes, con altos niveles de radiación solar y baja precipitación pluvial. Aunque el origen de la higuera no se ha determinado, se especula que es originaria de África, India o China [12]. Es una de las plantas más comunes en México y se encuentra en varios estados mexicanos, entre los cuales se incluye Baja California. Por otra parte, se está posicionando como un cultivo energético promisorio para la producción de biodiesel, debido a que no es comestible, a su alto contenido de aceite y adaptabilidad a suelos y condiciones climáticas diversas. Actualmente en la Universidad Autónoma de Baja California en conjunto con el Instituto de Ingeniería se realiza la tecnificación y mejoramiento genético de la higuera para desarrollar nuevos genotipos que ofrezcan mayores rendimientos de aceite y mayor resistencia a climas extremos como los que se presentan en la región [12,13]

## Diesel cycle

Air entering around the open intake valve, fills the cylinder as the piston falls on the intake stroke. The intake valve closes as the piston rounds bdc on the compression stroke Fig 1. The piston rises, compressing and heating the air to ignition temperatures. Injection begins near tdc on the compression stroke and continues for about 40° of crankshaft rotation. The fuel ignites, driving the piston down in the bore on the expansion, or power stroke. The exhaust valve opens and the piston rises on the exhaust stroke, purging the cylinder of spent gases. When the piston again reaches tdc, the four-stroke-cycle is complete, two crankshaft revolutions from its beginning [14].

Fig. 1 Ciclo diesel.



## Exhaust Emissions

Una de las principales ventajas de utilizar biodiesel como combustible sustituto del diesel en motores de combustión interna, es la oportunidad de reducir las emisiones contaminantes HC, CO, CO<sub>2</sub>, PM, SO<sub>x</sub>, PAH y Nitro-PAH, así como los efectos negativos causados al ambiente como por ejemplo gases de efecto invernadero y en la salud humana como enfermedades crónico-respiratorias, asma entre otros, dado que algunos de los contaminantes generados por la combustión del diesel como los PM y HC son tóxicos y carcinógenos [15]. Numerosos estudios han mostrado los efectos positivos del biodiesel en la calidad del aire.

Por otra parte, debido a que el biodiesel es de origen vegetal las emisiones de SO<sub>x</sub> son despreciables. Esto representa una ventaja competitiva con respecto al diesel con un alto contenido de azufre. En lo que concierne a las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la combustión del biodiesel, estas se reintegran al ciclo de CO<sub>2</sub> que utilizan las plantas oleaginosas para su crecimiento y desarrollo. Este balance no resulta neutro, debido a que se requiere de una demanda energética para la siembra y cosecha del cultivo, lo que implica la quema de combustibles fósiles para efectuarlo y emisiones asociadas como se observa en la Tabla 1.

Table 1 Biodiesel emissions comparison [6].

| Emission type                          | B20  | B100  |
|--|------|-------|
| Unburned hydrocabons                   | -20% | -67%  |
| CO                                     | -12% | -48%  |
| CO <sub>2</sub>                        | -16% | -79%  |
| PM                                     | -12% | -47%  |
| NO <sub>x</sub>                        | +2%  | +10%  |
| SO <sub>x</sub>                        | -20% | -100% |
| Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) | -13% | -80%  |
| Nitro- PAH                             | -50% | -90%  |

El uso de los combustibles oxigenados, como el biodiesel, ha demostrado ser una forma efectiva de reducir las emisiones de hollín en motores diesel [9, 10]. Los combustibles oxigenados reducen la formación de hollín por átomos de secuestro de carbono del hollín formando mediante la creación de enlaces carbono-oxígeno, y disminuyen el contenido de compuestos aromáticos en comparación con los combustibles derivados del petróleo.

## Materiales y métodos

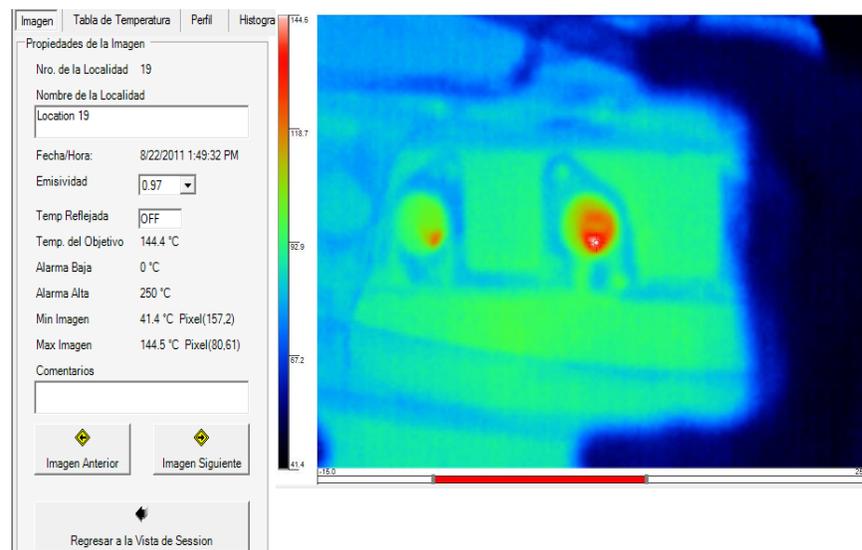
### 1.1 Modelo de Simulación

En el presente trabajo se utilizó el Software Aspen®, herramienta que permite simular el procesos de combustión de un ciclo diesel, considerando las condiciones de operación de un motor diesel de 3 pistones, mostradas en la Tabla 2. En la simulación se realizaron corridas con mezclas diesel-biodiesel B5, B10, B20, B50, B100 (donde el número consecutivo a la letra B denota el porcentaje de biodiesel presente) y diesel en las cuales se utilizó una relación aire-combustible de 1:15, [15]. Como información adicional se alimentó al simulador con datos de temperatura de gases de combustión medidos con una cámara termográfica Fluke Ti30 con rango de temperatura de -15 hasta 255 °C, como se ilustra en la Fig. 2. Las lecturas de temperaturas se tomaron en la salida de los gases de escape del block del motor KUBOTA D600-B [16]. Se consideró una presión dentro de la cámara de combustión de 4.6 MPa, basada en el manual de Taller de Motores Diesel KUBOTA.

Tabla 2. Descripciones técnicas del motor tomado como referencia

| Especificación         | Textron KUBOTA D600-B         |
|------------------------|-------------------------------|
| Tipo                   | Diesel, inyección directa     |
| Alimentación           | Presión atmosférica           |
| Desplazamiento         | 600 cc                        |
| Configuración          | 3 Cilindros en línea 4 Ciclos |
| Diámetro X carrera     | 64 X 62.2 (mm)                |
| Relación de compresión | 18                            |
| Consumo                | 0.48 kg/ h                    |
| Potencia               | 16.5 HP                       |

Fig 2. Imagen térmica tomada en la salida de los gases de combustión del block del Motor.



Para realizar la simulación de combustión de las mezclas de combustibles, se definieron las corrientes de entrada al mezclador, para obtener la corriente de salida *FUELMIX* Fig 3. En la corriente *AIR*, se especificó la mezcla en

porcentaje de aire estándar compuesta en un 21% O<sub>2</sub> y un 79% N<sub>2</sub>. Cabe mencionar que se consideró un exceso de aire para asegurar una combustión completa.

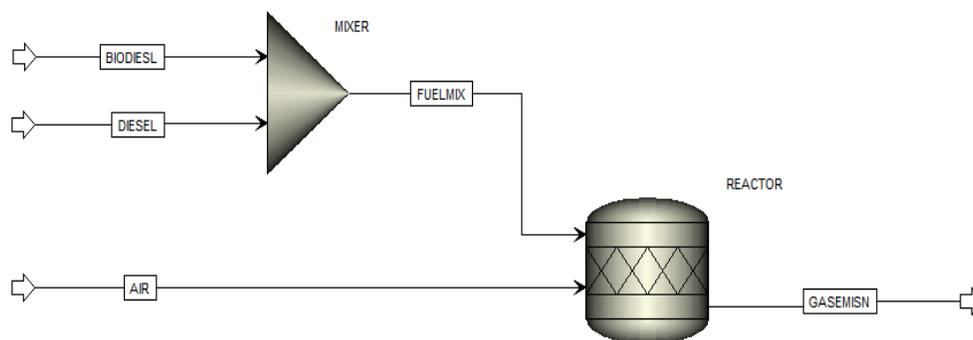


Figura 3. Diagrama de Proceso

En lo que corresponde a la combustión, se realizó la simulación, para el cual se utilizó un modelo de reactor ideal. Las condiciones de entrada se muestran en la Tabla 3. Se establecieron condiciones de los componentes de alimentación. La corriente de proceso denominada *GASEMISN* está conformada por los productos de combustión: CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

Tabla 3. Condiciones de alimentación de la simulación

| Flujo másico<br>(kg/hr) | Condiciones de la simulación a 25 °C y 1 atm |        |          |           |          |           |          |          |          |           |          |           |
|-------------------------|--|--------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
|                         | Diesel                                       |        | B5       |           | B10      |           | B20      |          | B50      |           | B100     |           |
|                         | Aire   | Diesel | Aire     | B5        | Aire     | B10       | Aire     | B20      | Aire     | B50       | Aire     | Biodiesel |
| Methyl Oleate           | 0  | 0      | 0        | 9.70E-04  | 0        | 1.93E-03  | 0        | 3.86E-03 | 0        | 9.65E-03  | 0        | 0.0193    |
| Methyl Linoleate        | 0  | 0      | 0        | 1.07E-03  | 0        | 2.14E-03  | 0        | 4.29E-03 | 0        | 0.010715  | 0        | 0.02143   |
| Methyl Ricinoleate      | 0  | 0      | 0        | 0.0222027 | 0        | 0.0444055 | 0        | 0.088811 | 0        | 0.2220275 | 0        | 0.444055  |
| Methyl Palmitate        | 0  | 0      | 0        | 2.72E-04  | 0        | 5.43E-04  | 0        | 1.09E-03 | 0        | 2.72E-03  | 0        | 5.43E-03  |
| Methyl Stearate         | 0  | 0      | 0        | 2.72E-04  | 0        | 5.43E-04  | 0        | 1.09E-03 | 0        | 2.72E-03  | 0        | 5.43E-03  |
| Methyl Linolenate       | 0  | 0      | 0        | 1.09E-04  | 0        | 2.18E-04  | 0        | 4.36E-04 | 0        | 1.09E-03  | 0        | 2.18E-03  |
| Methyl Eicosenoate      | 0  | 0      | 0        | 1.09E-04  | 0        | 2.18E-04  | 0        | 4.36E-04 | 0        | 1.09E-03  | 0        | 2.18E-03  |
| Diesel                  | 0  | 0.5    | 0        | 0.475     | 0        | 0.45      | 0        | 0.4      | 0        | 0.25      | 0        | 0         |
| Oxígeno                 | 12.98367                                     | 0      | 12.84675 | 0         | 12.11691 | 0         | 12.43662 | 0        | 11.61615 | 0         | 10.24863 | 0         |
| Nitrógeno               | 48.84333                                     | 0      | 48.32825 | 0         | 47.81396 | 0         | 46.78538 | 0        | 43.69885 | 0         | 38.55437 | 0         |

## 1.2 Composición de combustibles



## 1.2.1 Biodiesel

Para representar al biodiesel, se alimentaron en la base de datos del simulador, las propiedades físicas, químicas y termodinámicas del ricinoleato de metilo ( $C_{19}H_{36}O_3$ ) el cual es el éster que corresponde al ácido graso ricinoico, principal componente del aceite de ricino. Se utilizó la siguiente composición de metilésteres para la simulación de biodiesel de higuera [11]. Como se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición de Metilésteres de Biodiesel de Higuera

| Composición de Biodiesel de Higuera |              |                   |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|
| Metiléster                          | Fracción (%) | Fórmula           |
| Methyl Ricinoleate                  | 88.811       | $C_{19}H_{36}O_3$ |
| Methyl Linoleate                    | 4.286        | $C_{19}H_{34}O_2$ |
| Methyl Oleate                       | 3.860        | $C_{19}H_{36}O_2$ |
| Methyl Stearate                     | 1.086        | $C_{19}H_{38}O_2$ |
| Methyl Palmitate                    | 1.086        | $C_{17}H_{34}O_2$ |
| Methyl Linolenate                   | 0.436        | $C_{19}H_{32}O_2$ |
| Methyl Eicosenoate                  | 0.436        | $C_{21}H_{40}O_2$ |

## 1.2.2 Diesel

Se consideró como molécula representativa del diesel al Hexadecano ( $C_{16}H_{34}$ ) debido a que tiene un poder calorífico inferior de 43.94 MJ/kg, muy semejante al reportado para el diesel mexicano con un valor de 44.04 MJ/kg [17].

## 1.3 Método Termodinámico

Para la seleccionar un método termodinámico apropiado para simular un proceso, se tomaron en cuenta cuatro factores, la naturaleza de las propiedades de interés, la composición de las mezclas, rangos de presión y temperatura; así como la disponibilidad de parámetros. El método base elegido fue SR-POLAR, a diferencia del método NRTL el cual se utiliza cuando las presiones de operación son menores a 10 bar. Se utilizó la herramienta de ASPEN de nombre Assistant-Property method selection, para corroborar el método base para correr la simulación, dando como resultado el método base SR-POLAR [18].

## 1.4 Reacciones Químicas

Las reacciones químicas consideradas en la combustión de los metilésteres (biodiesel), diesel y sus diferentes mezclas (B5, B10, B20, B50) que fueron alimentadas al simulador, se muestran en la Tabla 5. La composición del biodiesel, es decir los porcentajes de metil ésteres presentes determinan las propiedades del mismo, es decir su PCI, Viscosidad cinemática, punto de fusión, punto de nube, número de cetano, punto de ebullición [15].

Tabla 5. Reacciones químicas del proceso de combustión de los metilésteres y diesel

| Rx No. | Compound | Stoichiometry |
|--------|----------|---------------|
|--------|----------|---------------|



|   |                       |  |
|---|-----------------------|--|
| 1 | Methyl Ricinoleate    | $C_{19} H_{36} O_3 + 26.5 O_2 = 18 H_2O + 19 CO_2$ |
| 2 | Methyl Oleate         | $C_{19} H_{36} O_2 + 27 O_2 = 18 H_2O + 19 CO_2$   |
| 3 | Methyl Linoleate      | $C_{19} H_{34} O_2 + 26.5 O_2 = 17 H_2O + 19 CO_2$ |
| 4 | Methyl Stearate       | $C_{19} H_{38} O_2 + 27.5 O_2 = 19 H_2O + 19 CO_2$ |
| 5 | Methyl Palmitate      | $C_{17} H_{34} O_2 + 24.5 O_2 = 17 H_2O + 17 CO_2$ |
| 6 | Methyl Linolenate     | $C_{19} H_{32} O_2 + 26 O_2 = 16 H_2O + 19 CO_2$   |
| 7 | Methyl Eicosenoate    | $C_{21} H_{40} O_2 + 30 O_2 = 20 H_2O + 21 CO_2$   |
| 8 | Diesel (N-Hexadecane) | $C_{16} H_{34} + 24.5 O_2 = 17 H_2O + 16 CO_2$     |

## Resultados y discusiones

Una vez ingresados los datos en el simulador, se obtuvieron los poderes caloríficos para cada uno de los metil ésteres que conforman el biodiesel obtenido a partir de la higuera como se muestra en la Tabla 6. Es de esperarse que el poder calorífico del biodiesel, sea lo más aproximado al del ricinoleato de metilo, debido a que este último es el compuesto que se encuentra en mayor porcentaje de la composición, 88.81%.

Tabla 6. Poder calorífico inferior de los metilésteres derivados del aceite de higuera.

| Methyl Esters      | Lower Heat Value<br>(MJ/kg) |
|--------------------|-----------------------------|
| Methyl Oleate      | 37.43                       |
| Methyl Linoleate   | 40.13                       |
| Methyl Ricinoleate | 38.16                       |
| Methyl Palmitate   | 39.12                       |
| Methyl Stearate    | 42.82                       |
| Methyl Linolenate  | 37.51                       |
| Methyl Eicosenoate | 40.84                       |

### Biodiesel

Los resultados reflejan que el B100 presenta un poder calorífico inferior menor comparado con el del diesel, con una variación del 12.85%, por lo que el poder calorífico de las diferentes mezclas diesel-biodiesel tienen una tendencia a disminuir como se puede observar en la Fig 4. Dichos resultados son congruentes con los datos reportados por diferentes autores [6-10]

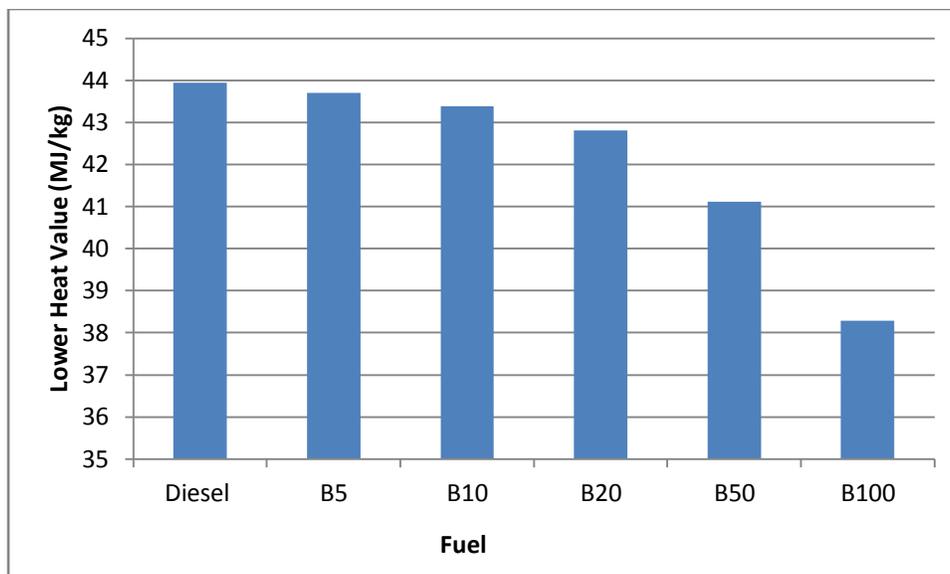


Figura 4. Poder calorífico de los combustibles.

Las variaciones porcentuales del poder calorífico para las mezclas restantes con respecto al diesel, esto es, B50, B20, B10 y B5 fueron de 6.42%, 2.57%, 1.27% y 0.54% respectivamente.

La disminución del poder calorífico tanto del biodiesel como sus mezclas, representa una desventaja importante comparado con el diesel, puesto que implica repercusiones directas que se reflejarían en un descenso de la potencia del motor, así como un incremento en el consumo de combustible, tratando de obtener la misma potencia se incrementa el consumo de combustible.

### Emisiones

Una de las ventajas más importantes que tiene el biodiesel, es el beneficio ambiental, ya que su utilización representa una oportunidad para contribuir en la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Ello ayudaría al mejoramiento de la calidad de aire y salud pública en cuanto a enfermedades crónicas respiratorias se refiere. Si bien la Tabla 7 indica la disminución de emisiones al aumentar la concentración de biodiesel, es necesario considerar los aspectos y retos técnicos así como de compatibilidad con materiales del motor con los que está en contacto con el combustible. Esto es necesario para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema en el que se implemente el biodiesel.

Tabla 7. Emisiones de diesel, biodiesel y mezclas.

| Flujo másico (Kg/hr) | Gases de Combustión a 144.5 °C y 4.6 MPa |         |         |         |         |         |
|----------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
|                      | B5                                       | B10     | B20     | B50     | B100    | Diesel  |
| H <sub>2</sub> O     | 0.2340                                   | 0.2313  | 0.2258  | 0.2095  | 0.1824  | 0.2367  |
| O <sub>2</sub>       | 12.2473                                  | 12.1169 | 11.8562 | 11.0739 | 9.7701  | 12.3778 |
| CO <sub>2</sub>      | 0.5405                                   | 0.5369  | 0.5296  | 0.5077  | 0.4712  | 0.5442  |
| N <sub>2</sub>       | 48.3283                                  | 47.8140 | 46.7854 | 43.6989 | 38.5544 | 48.8433 |



## Conclusiones

El uso de simulador para la simulación de combustión utilizando como mezclas diesel-biodiesel de higuera, con una composición de metil ester determinada, proporcionó información importante para el proceso de combustión, considerando al biodiesel como combustible, permitió:

- d) Determinar el poder calorífico del biodiesel y sus mezclas con diesel, considerando una composición más apegada a la realidad, y contar con información confiable que además, ayuda a comprender sus efectos en relación al funcionamiento y operación del motor.
- e) Estimar las emisiones de  $\text{CO}_2$  generadas por la combustión del diesel, biodiesel y mezclas, en donde se confirma a través de los resultados, la disminución de tales emisiones que implica la sustitución del diesel por biodiesel. Sin embargo, a primera vista puede no parecer una disminución sustancial, pero no hay que olvidar que el biodiesel al provenir de fuentes renovables como es la biomasa, deja de aportar a la atmosfera una gran fracción del  $\text{CO}_2$  que fue utilizado por las plantas oleaginosas para su desarrollo. De esta manera completando el ciclo de carbono.



## Referencias

- [1] Graboski M, McCormick R (1998) Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 24:125–164. doi: 10.1080/15567030903397982
- [2] Canacki M (2007) Combustion characteristics of a turbocharged di compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. *Bioresource Technology* 98:1167– 1175.
- [3] Lin YC, Lee WJ, Hou HC (2006) Pah emissions and energy efficiency of palmbiodiesel blends fueled on diesel generator. *Atmospheric Environment* 40:3930–3940. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.02.026
- [4] Rakopoulos CD, Antonopoulos KA, Rakopoulos DC et al. (2006) Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or biodiesels of various origins. *Energy Conversion and Management* 47:3272–3287. doi:10.1016/j.enconman.2006.01.006
- [5] Altin R, Cetinkaya S, Yucesu HS (2001) The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Conversion and Management* 42:529–538.
- [6] Heywood J (1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Book Company, New York
- [7] Canakci M, Gerpen JV, (1999) Biodiesel production via acid catalysis. *American Society of Agricultural Engineers* 42:1203-1212.
- [8] Vyas A, Verma J, Subrahmanyam N (2010) A review on fame production processes. *Fuel* 89:1-9. doi:10.1016/j.fuel.2009.08.014
- [9] Nielsen P, Brask J, Fjerbaek L (2008) Enzymatic biodiesel production: Technical and economical considerations. *Eur. J. Lipid Science and Technology* 110:692-700. doi: 10.1002/ejlt.200800064
- [10] Lim BP, Maniam GP, Hamid SA (2009) Biodiesel from adsorbed waste oil on spent bleaching clay using CaO as a heterogeneous catalyst. *European Journal of Scientific Research* 33:347-357. doi:10.1016/j.biortech.2009.07.036
- [11] Refaat A (2010) Biodiesel production using solid metal oxide catalysts. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 8:203-221.
- [12] Scarpa A, Guerci A (1982) Varius uses of the castor oil plant (*Ricinus communis* L.). A Review. *Journal of Ethnopharmacology* 5:117-137.
- [13] INIFAP: <http://www.inifap.gob.mx/>
- [14] Dempsey P (2008) *Troubleshooting and Repairing Diesel Engines*. Fourth Edition. McGraw-Hill.
- [15] NREL: National Renewable Energy Laboratory (2009) *Biodiesel Handling and use guide*.
- [16] WORKSHOP MANUAL DIESEL ENGINE KUBOTA Z400-B. Z430-B. D600-B. D640-B V800-B. Kubota.
- [17] SENER, Secretaria de Energía, Balance Nacional de Energía 2009.
- [18] Carlson EC (1996) *Don't Gamble With Physical Properties for Simulations*. Aspen Technology, Inc. CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS.



# Electricity Potential Generation by Wheat Straw from Mexicali Valley, Mexico

Conrado García, Gisela Montero, Marcos A. Coronado, Armando Pérez  
Engineering Institute  
Universidad Autónoma de Baja California  
Mexicali, Mexico

Ana M. Vázquez  
School of Engineering and Business Guadalupe Victoria  
Universidad Autónoma de Baja California  
Mexicali, Mexico

**Abstract—** During 2009, 48% of farmland in Mexicali Valley (MV), Baja California, Mexico was used for growing wheat for grain, it means 88,439 Ha. Although wheat is a priority crop in Baja California, farmers of MV do not have options for the proper disposal of wheat straw generated as a remnant of the crop of wheat. Because of this, wheat straw is considered a problematic and worthless waste, and it is discarded through a burning *in situ*. 85% of the straw is burned. This practice is used to dispose 548,764 t of waste. This work analyses the feasibility of exploitation of 6.86 PJ of heat energy per cycle from agricultural waste biomass to be used as fuel for power generation. The results indicate that the potential for electricity production accounts for 9% of the installed capacity of geothermal park Cerro Prieto (720 MW) located in MV and 6.6 times the installed capacity of the wind farm La Rumorosa (10 MW), located in the municipality of Tecate.

**Keywords-** biofuels; energy resource; power generation; wheat straw

## I. INTRODUCTION

The waste from agricultural activities corresponds to the discarded parts of cultivated plants for food and/or industrial use, such as: wheat straw, corn stover, cotton stalks. A fraction of such waste is usually incorporated into the soil to maintain its fertility and texture conditions, another portion may be allocated to energy use. This use has, however, some drawbacks:

- The agricultural traditional exploitation implies the use of large expanses of lands; due to it, the cost of recollection of residues increases very much, losing its profitability.
- The density of the residual biomass in general is very low, which forces to move huge volumes and to resort to processes of densification for his later conversion in energy.

The biomass energy has had resurgence due to the inevitable depletion of crude oil reserves around the world and takes advantage of their renewable nature and potentially sustainable. Biomass is the only renewable energy source capable of being transformed by various processes, in fuels in the three states of matter: solid, liquid and gas.

From a technical point of view and depending on their characteristics, the agricultural residues can be converted into useful energy by thermochemical or biochemical processes. Its moisture content and lignin content in each case determine the process more convenient. [1]

Currently in Mexico, the fate of agricultural biomass waste, as raw material for its further transformation, is restricted to a few options such as food for livestock and incorporation to soil, but it is not economically viable, then the farmers prefer to dispose it through open burning. This is a common practice used by the farmers in Mexicali Valley (MV) in Baja California, in order to reduce the costs of land preparation for next cycle and also prevent the spread of pests and diseases in future crops.

The burning of wastes is carried out without any control, putting at risk other plantations as well as the integrity of the inhabitants of the surrounding, and also damages the crop land because it eliminates beneficial organisms, nutrients and organic matter which serve to retain moisture. The residual biomass of wheat contains energy due to its chemical composition consisting mainly of lignocellulosic complex. This is the source of heat energy delivered by combustion of the wheat straw.

In 2009, 48% of farmland in MV, Baja California, Mexico was used for growing wheat for grain, it means 88,439 Ha. With such extension, Mexicali's Valley took part with about 75% of the wheat crop in Baja California which represents 13.5% of the harvested surface of national wheat.

Although wheat is a priority crop in Baja California, farmers of MV do not have options for proper disposal of wheat straw generated as a remnant of the crop of wheat. Because of this, they consider wheat straw as a problematic and worthless waste, and they discard it through a burning *in situ*.

This proposal analyses the feasibility of exploitation of 6.86 PJ of heat energy per cycle from agricultural waste biomass for use as fuel for power generation.

## II. STUDY AREA

### A. Geographical Context

This evaluation was conducted in the agricultural area of the Municipality of Mexicali, Baja California, with the coordinates 32 ° 40' N latitude, 115 ° 27' W, altitude 10 meters [2], called Valley of Mexicali, located east of the town and partly within the Colorado River Delta. This agricultural area is part of a geographical unit shared with the neighboring

Imperial Valley California, USA, artificially separated by the political division between the two countries [3] (Fig. 1).



Figure 1. Geographical location of Baja California

The average annual temperatures are extreme, and have large thermal contrasts, with highs near 50°C in summer while the minimum temperatures in winter are around 0°C. The average annual rainfall is 75 mm [4][5].

### B. Agricultural Area

In 2007, the agricultural area of MV had an area of 163,597 Ha [6]. As seen in Fig. 2, MV holds the largest agricultural area of Baja California.

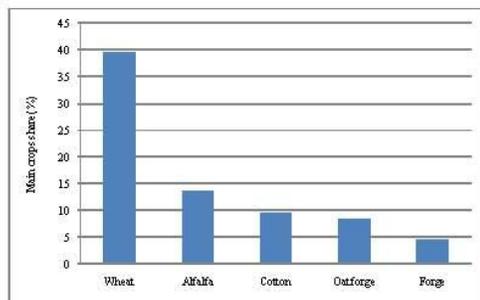


Figure 2 Harvested land share by municipality in Baja California

### C. Wheat Crop

There are two purposes of the culture of wheat in Mexicali's Valley, one consists of his total utilization, before grain formation, as cattle feeding, and the most common is the

obtaining of the grain for diverse applications, being the residues of this culture the object of this study.

The wheat crop for grain in MV occupies about half the agricultural area (Fig. 3), which represent 13.5% of national production [6] [7]. It presents an average yield of wheat harvested from 6.3 t/Ha [8], highlighting that it is nationally recognized as one of the healthiest in the country, free of disease. In MV, the wheat crop is made in the period of "autumn-winter." The sowing is done on December and early January. The physiological maturity of wheat is reached 125 days after sowing [8][9] and the harvest is approximately 2 to 3 weeks later.

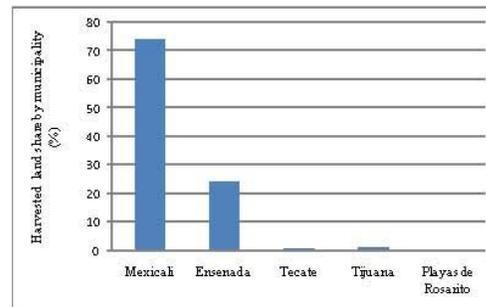


Figure 3. Main crops share in MV

### D. Wheat Straw

Once the wheat harvest is done, approximately 15% of wheat straw is used in any of the following activities:

- Food for livestock. The straw can be used in ruminant nutrition, a physical or chemical pre-treatment is applied to increase digestibility mostly farmers prefer to feed cattle with alfalfa, rye grass or sudan.
- Incorporation into soil.
- A good source of fiber for making construction material.
- Base for the cultivation of mushrooms.

The remaining 85% is burned in open field [10]. The waste generated in MV is attractive from the standpoint of energy, due to the large volumes available and the high energy content of this material.

### E. Mexican Regulations for the Burning of Agricultural Waste

The most common causes of forest fires are agricultural burning, a high percentage of forest fires are originated in the development of agricultural activities where the use of fire as a tool for production, has a long cultural tradition.

Its traditional use has been altered by the current economic and social dynamics, so it is necessary to mitigate or reduce that risk and methods to regulate use of fire to protect ecosystems and human populations [11].

The NOM-015-SEMARNAT/ SAGARPA-2007 Mexican Official Standard establishes the specifications, criteria and procedures for social order and government involvement in detecting and fighting fires [11].

It should be noted that farmers in MV usually do not apply an authorization for the burning of agricultural land. The reasons for this behavior are usually the following:

- Lack of knowledge of a rule
- Lack of training to perform open burning considering the weather conditions.

### III. MATERIALS AND METHODS

For the development of this work, we consulted the statistical information system of agricultural crops, available at the State Office of Information for Sustainable Rural Development (OEIDRUS) called Statistical Yearbook of agricultural production [6]. The search was limited to cyclic and perennial crops with temporary irrigation method for the years from 2002 to 2009.

The period of availability of the straw, initiates with the crop of the grain of wheat. For early sowings, the crop begins at the end of April. For the sowings of December, the crops are affected in May and June and the late sowings are harvested in the first days of July. The distribution of the crops for these months is due to diverse factors between which there stand out the climatic conditions of the sowing and of the crop, as well as the availability of the machinery and agricultural equipment.

The calculations of this work were carried out taking into account: a) the availability of wheat straw, b) the open burning of 85% wheat straw [10], and c) an average generation of wheat straw, representative of different varieties grown in MV. Derived from this, an index of wheat straw to 7.3 t/ha was applied [12]. McKendry [13] reported a calorific value of 17.3 MJ/kg, however, in this work was considered a calorific value of 12.5 MJ/kg, given that wheat straw produced in MV has not been characterized

Furthermore, the use of the energy contained in wheat straw to generate electricity in a combined cycle plant powered by steam was evaluated. For such plants, the reported efficiency varies from 33 to 34%, when using wood waste as fuel for power plants [14]. However, the present assessment is based on a conservative value of the conversion efficiency of 30%.

From the analysis of information extracted from the database OEIDRUS, data for the crops in MV were obtained. Using the generation rate of wheat straw and conversion efficiency, the amount of biomass available annually and the potential electricity generation were estimated.

Finally, complete content and organizational editing before formatting. Please take note of the following items when proofreading spelling and grammar:

### IV. RESULTS AND DISCUSSION

In order to identify the participation of the wheat crop, and the information for each city in the state of Baja California, the statistical information of national agricultural production was

examined. Fig. 4 displays the distribution of crops in Mexico, for the year 2009 and appears that the wheat was cultivated on an area corresponding to 3.97% of total agricultural land which is 828,407 ha.

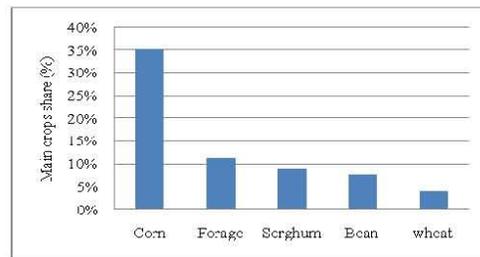


Figure 4. Distribution of agricultural land for cultivation in Mexico.

In 2009, Baja California was ranked as the third state of Mexico with the largest area of wheat harvest, with 13.5%, as shown in Fig. 5.

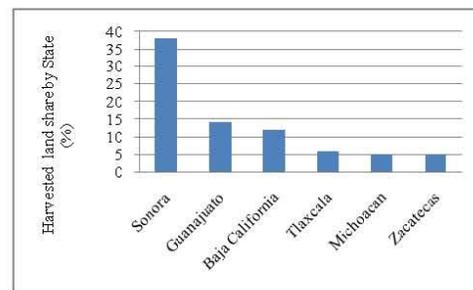


Figure 5. Distribution of the principal states of Mexico with the highest wheat acreage.

Mexicali Valley is the largest producer of wheat in the state of Baja California, with 88,439 ha, followed by the municipality of Ensenada with 10,934 ha, as shown in Fig. 6.

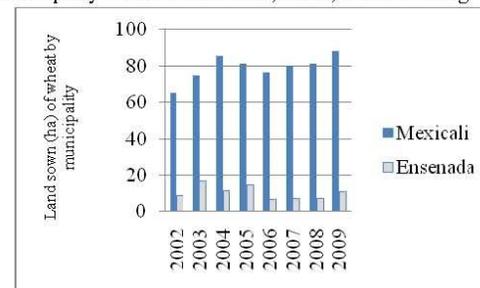


Figure 6. Land sown (ha) of wheat per municipality in Baja California

The rest of the municipalities Tecate, Rosarito and Tijuana have insignificant areas of wheat growing compared to Mexicali and Ensenada.



## V. POTENTIAL ENERGY OF WHEAT STRAW

Wheat straw is an important source of renewable energy available in biomass generated at the end of each harvest. In MV are produced 645,605 t of wheat straw, of which 15% are allocated for various purposes: food for cattle, incorporation into soil, among others, and the remaining 85%, it means 548,764 t was burned. Based on the estimated volume and considering a conservative value of the calorific value of wheat straw, it signifies a value of 6.13 PJ of energy thrown into the environment each year.

This energy could be converted into electricity by a combined cycle plant with an installed capacity of 65 MW, this represents 9% of the installed capacity of the geothermal park Cerro Prieto (720 MW) located in the Valley Mexicali and 6.6 times the installed capacity of the wind plant La Rumorosa (10 MW), located in the municipality of Tecate.

## VI. COMPARISON OF RESULTS

In Spain in the province of Navarra, the Sangüesa plant, burn cereal straw to generate electricity. This power plant delivers 25 MW to the electrical network. It requires 160,000 t of wheat straw per year [12]. It is the largest plant of south of Europe, that uses biomass from forest residues.

For this, in order to return viable any exploitation of energetic utilization, of thermal and electrical use, it is advisable not to include in the same one the labors of extraction.

## VII. CONCLUSIONS

The potential exists for the generation of electricity by means of the combustion of the residue of the crop of the wheat. It is pertinent to mention that, though the estimations were calculated bearing a heating power and a performance in mind minors that they brought ones like typical for this material, the preliminary results indicate that the availability of raw material is sufficient to supply a plant of cycle combined of 65 MW.

It is necessary to mention that the managing of the systems with small head offices presents a major complexity that with big generations, which is not an impediment but an own characteristic of the size of the plants since it happens with any equipment.

The crop of wheat in Mexicali's Valley represents approximately 75 percent of the cultivated surface of wheat, in the condition of Baja California, which grants certain level of confidence in the supply of biomass that would serve as fuel for the mentioned plant. Nevertheless, there exists the risk of shortage of the residual biomass opposite to the continuity of the demand of the electric power, which is surmountable in some cases, for the own decrease of demand of the industry that it supplies, for the storage of the residual biomass or by means of the interconnection to the electrical system.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors thank to CONACYT for the financial support and the Engineering Institute of Universidad Autónoma de Baja California by the facilities to develop this project.

## REFERENCES

- [1] Coordinación de Energías Renovables Dirección Nacional de Promoción Subsecretaría de Energía Eléctrica, Secretaría de Energía Argentina, Energías Renovables. "Energía Biomasa, 2008", 2008.
- [2] INEGI. (Instituto de Nacional de Estadística Geográfica) "Marco Geoestadístico", 1995.
- [3] J. A. Moreno, M. G. López. "Desarrollo agrícola y uso de agroquímicos en el Valle de Mexicali". 2005
- [4] Anuario Estadístico Municipal de Mexicali, 2008.
- [5] R. García. "Climatología Sinóptica de Mexicali". Reporte Técnico, Instituto de Ingeniería, UABC, 45 pp. (1995).
- [6] SFA. (Secretaría de Fomento Agropecuario), "Anuario Estadístico de la producción Agrícola para el Estado de Baja California". AVAILABLE: [www.sfa.gob.mx](http://www.sfa.gob.mx), [Retrieved: 05/08/2008].
- [7] Gobierno del Estado de Baja California., AVAILABLE: [www.bajacalifornia.gob.mx](http://www.bajacalifornia.gob.mx), [Retrieved: 05/08/2008]
- [8] INIFAP, (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) "Estudio estadístico-documental sobre variedades, grupos y calidad de trigo del Valle de Mexicali", 2008.
- [9] B. Martínez, L. López "Guía para producir trigo en planos en los Valles de Mexicali, y San Luis R.C., Sonora." INIFAP produce, folleto para productores Num. 38 (February 2002)
- [10] A. Moncada, M. Quintero M. "Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California". Región y Sociedad, septiembre-diciembre, año/vol. XX, número 043, El Colegio de Sonora, Sonora, México, 2008.
- [11] Norma Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAP/SAGARPA-1997 "Que regula el uso del fuego en terrenos forestales y agrícolas, y que establece las especificaciones, criterios y procedimientos para ordenar la participación social y de gobierno en la detección y combate de los incendios forestales".
- [12] SENER (Secretaría de Energía), "Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México", noviembre 2006.
- [13] McKendry P. "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass". Bioresource Technology 83 (2002) 37-46
- [14] IEA. (International Energy Agency) "Biomass for Power Generation and CHP", OECD/IEA, 2007.



## Emisiones de las quemas de residuos agrícolas en el Valle de Mexicali, 1987-2010

Marcos Alberto Coronado Ortega, Gisela Montero Alpírez, Conrado García González, Armando Pérez Sánchez, Laura Janet Pérez Pelayo

coronado.marcos@gmail.com

### Resumen

Baja California, México, se ubica en tercer lugar a nivel nacional con mayor superficie de trigo cultivada, con el 13.5%. Mexicali, capital de dicho estado, es el principal productor de trigo y representa el cultivo más importante de su Valle, con una superficie cultivada en el periodo 2009-2010 de 87,724 Ha. Esto conlleva a la generación de grandes cantidades de paja de trigo como residuo agrícola. Tradicionalmente el 85% de este residuo es dispuesto mediante la quema *in situ* a cielo abierto con el objetivo de preparar la tierra para el próximo ciclo agrícola, el 15% restante tiene diversas aplicaciones. Tal práctica repercute considerablemente en las emisiones de CO<sub>2</sub>, PM y CH<sub>4</sub> al medio ambiente, ocasionando un deterioro de la calidad del aire del Valle y ciudad de Mexicali, así como problemas en la salud poblacional. Por otra parte, se desaprovecha la energía contenida en la paja de trigo, la cual es potencialmente útil como biocombustible. Se presenta aquí un inventario de las emisiones generadas por las quemas de la paja de trigo realizadas *in situ* a cielo abierto, para el periodo 1987-2010. En los resultados destaca que las emisiones totales, considerando las quemas agrícolas progresivas en dirección del viento, pasaron de 25,370 t (1987) a 41,913 t (2010).

**Palabras Clave:** *biomasa, contaminación atmosférica, energía, simulación dinámica*

270

### 1. Introducción

La quema de biomasa es considerada como una fuente global y significativa de emisiones, contribuyendo con aproximadamente el 40% de CO<sub>2</sub>. El 90% de las quemas son iniciadas por el ser humano. Estas quemas inducidas son utilizadas con una diversidad de finalidades, como son deforestación, control de plagas, quemas de maleza y residuos, así como prácticas de cosecha. Se ha estimado que 8,700 Tg de materia seca es quemada en el mundo cada año y representa uno de los factores más importantes que afectan el cambio climático [1]. Los sistemas agrícolas en todo el planeta producen grandes cantidades de residuos. La quema de los residuos en el campo es una práctica común, sobre todo en los países en desarrollo. Tal es el caso de México, donde el sector agrícola se ubica como una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero [2].

Una de las zonas agrícolas más importante del Noroeste del país, es el Valle de Mexicali. Este valle se encuentra ubicado en el estado de Baja California, al Noroeste de México y comparte la misma cuenca atmosférica con el Valle Imperial, Estados Unidos. Su cultivo principal es el trigo, y es conocido como el de mayor rendimiento comercial en el país, con una productividad media en los últimos años de 6.3 t/ha. Dicho Valle, está posicionado a nivel nacional, como uno de los que cuenta con mayor superficie de trigo cultivada. Si bien las condiciones climáticas han sido favorables para este cultivo en la región, el uso de variedades mejoradas de alto potencial productivo y la experiencia del productor en la aplicación de los paquetes tecnológicos para su manejo han sido determinantes para lograr este nivel de producción [3]. La cosecha de trigo tiene asociada la generación de grandes cantidades de paja como residuo agrícola. Tradicionalmente el 85% de este residuo es dispuesto mediante la quema *in situ* a cielo abierto con el objetivo de



preparar los campos para dobles cultivos o para el siguiente ciclo agrícola, el 15% restante tiene diversas aplicaciones [4].

Los productores de trigo del Valle de Mexicali que llevan a cabo estas prácticas, señalan que la quema constituye una práctica tradicional, mientras que otros consideran que la incineración de residuos agrícolas es una necesidad, ya que se elimina maleza perenne, enfermedades y plagas. Sin embargo, se ha demostrado que contrario a las creencias de los productores, la quema calina el nitrógeno, fósforo y materia orgánica del suelo, además de generar costos adicionales y disminución de rendimientos y por ende mermas en la utilidad al obtener menos volúmenes por hectárea de trigo entre ciclo y ciclo [5]. Otros señalan que al quemar la paja de trigo, se evita el paso de maquinaria, se ahorra tiempo para la preparación del suelo para el siguiente ciclo y dinero en maquinaria, diesel y mano de obra del tractorista. Tal práctica repercute considerablemente en las emisiones de CO<sub>2</sub>, PM y CH<sub>4</sub> al medio ambiente, ocasionando un deterioro de la calidad del aire del Valle y ciudad de Mexicali así como problemas en la salud pública, como son enfermedades respiratorias. Cabe destacar que Mexicali es una de las ciudades con mayor incidencia de morbilidad por Infecciones Respiratorias Agudas (IRAs) del país. Por otra parte, la quema de la paja de trigo representa un desaprovechamiento de la energía contenida en la misma, la cual es potencialmente útil como biocombustible en la generación de electricidad y energía calorífica, así como en el transporte, una vez que es transformado en bioetanol [6]. De esta manera se contribuiría a diversificar la matriz energética regional, incrementando la participación de fuentes renovables.

En 1996, se estimaron 14,325 t y 2,143 t de emisiones de CO<sub>2</sub> y PM respectivamente, provenientes de las quemaduras agrícolas [7], mientras que para 2003 y 2004, fueron de 13,870.5 t y 1,667.8 t respectivamente [4]. Actualmente no existen estimaciones para años anteriores y posteriores a los mencionados. Es por ello que el presente trabajo tiene como objetivo la estimación de las emisiones asociadas a las quemaduras in situ a ciclo abierto de la paja de trigo generada en el Valle de Mexicali, para el periodo histórico 1987-2010.

271

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Paja de Trigo

Se consultaron las bases de datos de la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS) de Baja California en relación al sistema producto trigo, con el fin de obtener la serie histórica de superficie cosechada de trigo en el Valle de Mexicali para el periodo bajo estudio que se ilustra en la Tabla 1 [8].

*Tabla 1. Serie histórica de la superficie cosechada de trigo, 1987-2010*

| Periodo | Superficie cosechada de trigo [ha] | Periodo | Superficie cosechada de trigo [ha] |
|---------|------------------------------------|---------|------------------------------------|
| 1987-88 | 53,098                             | 1999-00 | 74,273                             |
| 1988-89 | 50,572                             | 2000-01 | 68,033                             |
| 1989-90 | 48,374                             | 2001-02 | 64,926                             |
| 1990-91 | 60,366                             | 2002-03 | 74,394                             |
| 1991-92 | 79,683                             | 2003-04 | 85,320                             |
| 1992-93 | 79,683                             | 2004-05 | 80,555                             |
| 1993-94 | 80,018                             | 2005-06 | 75,989                             |
| 1994-95 | 69,658                             | 2006-07 | 79,946                             |
| 1995-96 | 53,159                             | 2007-08 | 81,958                             |
| 1996-97 | 67,224                             | 2008-09 | 88,937                             |
| 1997-98 | 54,913                             | 2009-10 | 87,724                             |
| 1998-99 | 50,636                             |         |                                    |

Para realizar la estimación de la cantidad de paja de trigo generada para cada ciclo agrícola, se consideró un índice de generación de 7.3 t/ha [9]. McKendry reporta un poder calorífico inferior de

la paja de trigo de 17.5 MJ/kg [6]; para el cálculo de la energía total que se libera a partir de su combustión, se consideró un poder calorífico de 12.5 MJ/kg, debido a que la paja de trigo generada en el Valle de Mexicali no ha sido caracterizada.

## 2.2 Factores de emisión

Para la estimación de las emisiones de CO, PM y CH<sub>4</sub> asociadas a las quemas de la paja de trigo *in situ* a cielo abierto, se adoptaron los factores de emisión reportados por EPA AP-42 [10] que se muestran en la Tabla 2. Dentro del reporte de EPA destacan 2 series de factores que dependen del tipo de técnica de quema agrícola que se implemente:

- A. Quema frontal. Técnica de quema en la cual el fuego avanza en la dirección del viento.
- B. Quema en contracandela. Técnica de quema en la cual el fuego progresa en dirección opuesta al viento.

Tabla 2. Factores de emisión de la quema de paja de trigo a cielo abierto

| Tipo de quema          | Factores de Emisión [kg/t] |                 |    |
|------------------------|----------------------------|-----------------|----|
|                        | CO                         | CH <sub>4</sub> | PM |
| Quema frontal          | 64                         | 2               | 11 |
| Quema en contracandela | 54                         | 1.3             | 6  |

Debido a incertidumbre existente acerca de la técnica de quema que se utiliza en mayor proporción en el Valle de Mexicali, se realizaron los cálculos considerando ambas.

## 2.3 Modelo de simulación

En virtud de que las emisiones asociadas a las quemas agrícolas dependen de una gran cantidad de parámetros, con la finalidad de facilitar el análisis de las emisiones asociadas a las quemas de paja de trigo durante el periodo 1987-2010, se desarrolló un modelo dinámico en Stella<sup>®</sup>, cuya versión simplificada se ilustra en la Figura 1.

272

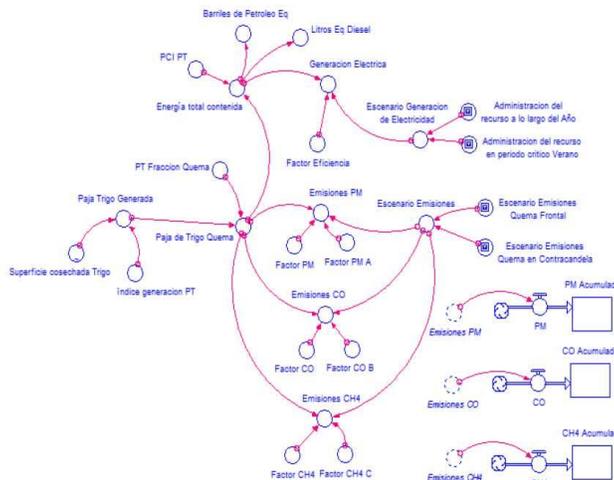


Figura 1. Modelo desarrollado en Stella para análisis de emisiones

Los parámetros utilizados para alimentar el modelo fueron los siguientes: a) serie histórica de la superficie cosechada de trigo b) índice de generación de paja de trigo, c) poder calorífico inferior de

la paja de trigo, d) factores de emisión de CO, CH<sub>4</sub> y PM, para técnicas de quema agrícola, e) factor de eficiencia de generación eléctrica a partir de biomasa y fracción de biomasa considerada para su combustión.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Emisiones asociadas a la quema de paja de trigo

Los resultados indican que las emisiones totales (CH<sub>4</sub>, CO y PM) se habrían incrementado de 25,370 t (1987) a 41,913 t (2010) considerando el tipo de quema frontal, mientras que para la quema en contracandela las emisiones habrían aumentado de 20,197 t (1987) a 33,367 t (2010). Ambos casos representan un incremento del 60.5 %.

Las Figuras 2 y 3 muestran las emisiones acumuladas para el periodo bajo estudio. En el caso de la quema frontal, el CO destaca en el primer lugar con 639,140 t, enseguida el PM con 109,852 t, y por último el CH<sub>4</sub> con 19,973 t. En la quema en contracandela las emisiones de CO, PM y CH<sub>4</sub> son 539,274 t, 59,919 t y 12,982 t, respectivamente.

273

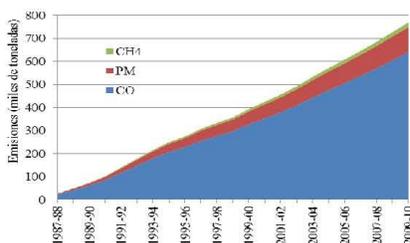


Figura 2. Emisiones acumuladas, quema frontal

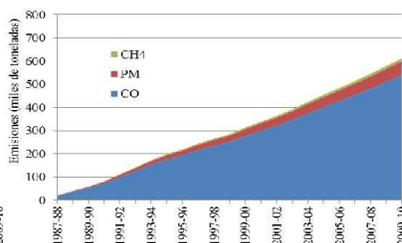


Figura 3. Emisiones acumuladas, quema en contracandela

La quema en contracandela evidencia una disminución en emisiones en comparación con la quema frontal, debido a que ésta progresa en dirección opuesta al viento, propiciándose una mayor interacción con el oxígeno. Esto favorece que los residuos ardan más lentamente y la combustión de la paja sea más completa.

Los resultados obtenidos a partir del modelo se ajustan con bastante aproximación a los calculados, con un error porcentual del 1.07 %. En la Figura 4 se expone el comparativo de emisiones acumuladas entre las calculadas y las obtenidas del modelo, considerando ambas técnicas de quema.

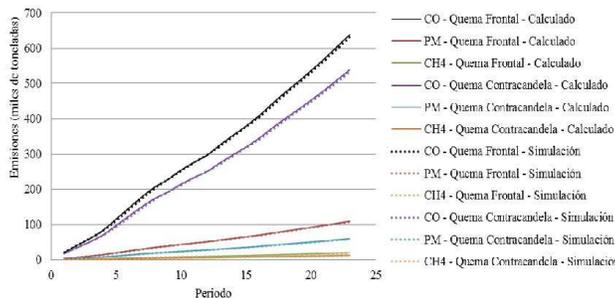


Figura 4. Comparativo de resultados estimados y simulados



### 3.2 Energía disponible de la paja de trigo

La energía total disponible a partir de la combustión de la paja de trigo periodo 1987-2010 se estimó en 124.8 PJ lo que equivale aproximadamente a 19.5 millones de barriles de petróleo, esto representa el 1.27 % de la producción de energía primaria nacional del año 2009 [11].

### 4. Conclusiones

La agricultura es una actividad intensiva y de gran importancia para el desarrollo económico de la región. Asimismo, significa la generación de grandes cantidades de biomasa residual como la paja de trigo, que al ser dispuesta mediante la quema *in situ* a cielo abierto, emite año tras año cantidades considerables de CO, CH<sub>4</sub> y PM, contaminantes que afectan la calidad del aire de Mexicali y su Valle. Es necesario implementar medidas para controlar y minimizar las quemas agrícolas y por ende reducir las emisiones asociadas. Por otra parte, existe un alto potencial biomásico que abre una gama de oportunidades para su aprovechamiento en procesos productivos como resultado de su contenido energético, que puede ir desde la generación de electricidad y energía térmica hasta la producción de bioetanol.

### Referencias Bibliográficas

- [1] Koppmann R., Czapiewski K., Reid J. “A review of biomass burning emissions, part I: Gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds”. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2005, 5: 10455—10516.
- [2] INE, SEMARNAT. Instituto Nacional de Ecología – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. “Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002”, Septiembre, 2006.
- [3] SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. “Plan rector del sistema producto trigo, Baja California”. Fecha de consulta: 03/05/2011. <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Publicaciones/SistemaProducto>.
- [4] Quintero M., Moncada A. “Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California”. *Región y sociedad*, 2008. Pp. 3-24.
- [5] SFA. Secretaría de Fomento Agropecuario. “Estudio sobre la utilización de la paja de trigo”, Junio, 2010. Fecha de consulta: 09/05/2011. [http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus\\_bca/](http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/)
- [6] McKendry P. “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass”. *Bioresource Technology* 83, 2002:37-46.
- [7] INE. Instituto Nacional de Ecología. “Inventario de emisiones de Mexicali”, 1996.
- [8] SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. “Serie histórica de producción de trigo grano”, sistema producto trigo. Fecha de consulta: 09/05/2011. <http://www.oeidrus-bc.gob.mx/sispro/trigobc/>
- [9] SENER, BID, GTZ. Secretaría de Energía, Banco Interamericano de Desarrollo, Cooperación Técnica Alemana. “Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México”, Noviembre, 2006.
- [10] EPA. Environmental Protection Agency. “Compilation of air pollutant emission factors”, 1992. EPA AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 2: Solid Waste Disposal, Open Burning.
- [11] SENER. Secretaría de Energía. “Balance nacional de energía”, 2009.



## Aceite esencial: potencial de obtención a partir de residuos de naranja en Mexicali, Baja California

José Ramón Ayala Bautista, Gisela Montero Alpírez, Laura Pérez Pelayo, Iliana Aguilar Hurtado, Armando Pérez Sánchez  
iq.ramonayala@gmail.com

### Resumen

Se presenta una estimación del potencial de aprovechamiento del residuo de la cáscara de naranja para la obtención de aceite esencial. Las técnicas consideradas para la producción de aceite esencial fueron: destilación por arrastre de vapor (hidrodestilación) y prensado mecánico, tomando como base la producción de naranja en el municipio de Mexicali. Este municipio forma parte de Baja California, estado ubicado al noroeste de la República Mexicana, presenta una importante producción de naranja en el país y cuenta con una superficie de 161.5 hectáreas dedicadas a este cultivo, con un rendimiento de 18.69 toneladas por hectárea, que lo sitúa por arriba de la media nacional. Tal producción es utilizada para satisfacer las necesidades de la población. Como consecuencia del consumo de este cítrico, se generan grandes cantidades de desechos de naranja, que constituyen residuos sólidos urbanos, cuya disposición se destina a un relleno sanitario, por lo que es deseable su aprovechamiento para la elaboración de productos de alto valor agregado y a la vez contribuir a la eliminación de una fuente de contaminación importante. Con base en un consumo de naranja anual per cápita nacional reportado en 2008, que fue de 37.2 kilogramos, se estimó una generación de 12,711 toneladas de desechos sólidos de cáscara de naranja en Mexicali y un potencial para producir 66.5 toneladas anuales de aceite esencial.

**Palabras Clave:** cítricos, hidrodestilación, prensado

544

### 1. Introducción

El municipio de Mexicali, se encuentra ubicado en el estado de Baja California en la región noroeste de la República Mexicana, al norte colinda con los Estados Unidos de América, específicamente con el estado de California; al sur con el estado de Baja California Sur; al este con el Golfo de California y al oeste con el Océano Pacífico. A largo de su historia Mexicali ha tenido grandes problemas de contaminación de aire, suelo y agua, es por ello que lamentablemente ocupa el quinto lugar de la lista de ciudades más contaminadas de México según lo reporta el Instituto Nacional de Ecología (INE) y gran parte de esta contaminación ha sido generada por la inadecuada disposición de los residuos de la población, los cuales se dividen en residuos peligrosos y residuos sólidos urbanos. [1], [2]

En 2009, el estado de Baja California representado en la Figura 1, dispuso aproximadamente 55,000 toneladas de residuos sólidos urbanos, mezcla constituida de orgánicos, reciclables y otros residuos. De ahí el interés y necesidad de aprovechar parte de ellos y recuperarlos como fuente de materias primas para procesos de generación de energía, o como materiales remediadores de suelo, por citar algunos de sus usos. Es así que la Cáscara de Naranja Residual, (CNR) representa una oportunidad para producir Aceite Esencial de Naranja (AEN). Dicho aceite es utilizado en industrias como la farmacéutica, alimenticia y de limpieza, siendo de importante valor por sus propiedades aromáticas.



Figura 1. Mapa de la república mexicana a la derecha, a la izquierda Baja California y el municipio de Mexicali resaltado en Amarillo [3], [4]

Los aceites esenciales son una combinación de compuestos secundarios de las plantas como terpenos y compuestos fenólicos [5]. Los terpenos son una familia de compuestos derivados del isopreno, sintetizadas por la misma planta, gracias a una serie de reacciones metabólicas [5]. Estas combinaciones de sustancias no son de vital importancia para la planta y en combinación, sus características pueden darle el olor característico. En el caso del AEN, el compuesto de mayor presencia es el d-limoneno, y se reportan concentraciones por alrededor del 90%. En la Figura 2, se muestran algunas estructuras correspondientes a los compuestos que se encuentran comúnmente en el AEN [6].

545

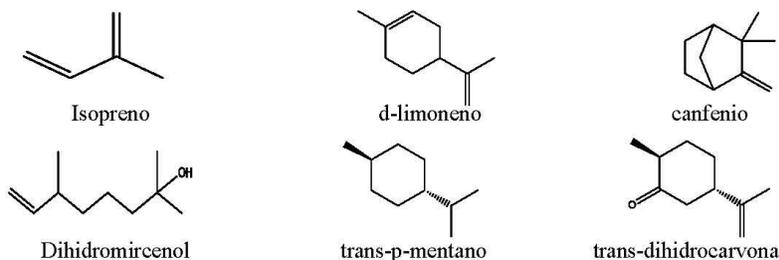


Figura 2. Compuestos más representativos del AEN. El isopreno no se encuentra presente en el aceite esencial, pero se incluye debido que se derivan el grupo funcional de los terpenos

Los métodos de extracción que generalmente se utilizan para obtener aceite esencial son: hidrodestilación o prensado mecánico. El primero consiste en hacer ebullición una solución de CNR en agua, donde el vapor de la misma arrastrará los compuestos por afinidad, esta corriente posteriormente se hace pasar por un intercambiador de calor y finalmente se separa por densidades, quedando el aceite esencial en la parte de arriba [7]. En el caso de prensado se utiliza maquinaria para romper la epidermis de la cáscara donde se encuentra el aceite, posteriormente comienzan a crearse áreas con mucha presión por la acción de la maquinaria, pero otras donde la presión es menor, provocando el flujo de aceite por éstas y finalmente, la cáscara se raspa produciendo pequeños trozos de residuos [8].

## 2. Desarrollo

La producción nacional de naranja en 2009 fue de 4, 193,484.44 toneladas, donde el 85% del total de esta producción la aportó el grupo conformado por 5 estados: Veracruz, Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí y Puebla, según se aprecia en la Figura 3 [9], [10].

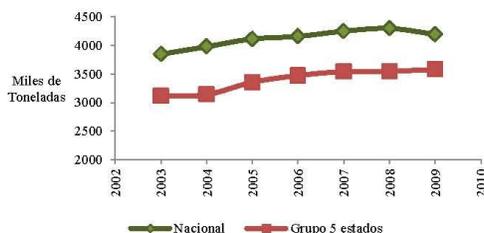


Figura 3. Comparativa de la producción nacional de naranja contra el grupo de los 5 estados de mayor producción en el país (Veracruz, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí y Puebla)

Baja California aporta el 0.083% de la producción nacional de naranja, mientras que el municipio de Mexicali influye en un 0.07% de este total nacional. En el estado de Baja California y hablando específicamente del área de estudio, es decir el municipio de Mexicali, las actividades agrícolas se desarrollan en el denominado Valle de Mexicali, con una superficie susceptible para siembra de 200 mil hectáreas, lo que representa una superficie del 62% hablando del Valle de Mexicali [3].

El Municipio de Mexicali, produce en promedio, cerca del 88% de toda la naranja cosechada en Baja California, y a pesar de que en 2009 este porcentaje disminuyó a 86%, con un total de 3,018 toneladas, como se destaca en la Figura 4, Mexicali permanece como el municipio más importante en la producción de naranja en el estado [9].

546

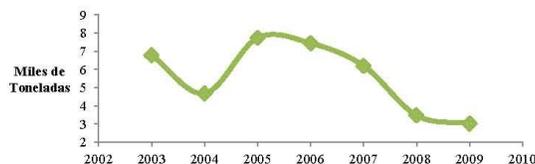


Figura 4. Producción de naranja en el municipio de Mexicali 2003-2009

Sin embargo, las toneladas de naranja producidas en el municipio de Mexicali solo satisfacen el 8% de la demanda de la población actual, como se muestra en la Figura 5, por lo que es necesario abastecerse de la naranja proveniente de las entidades del grupo de productores mencionados, o bien mediante la importación de otros países. [9]-[11]

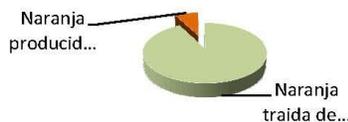


Figura 5. Porcentaje de satisfacción de demanda de naranja en Mexicali en 2009

### 3. Metodología

Según el reporte del censo de población 2000, el número de habitantes registrados en Mexicali fue de 784,709 [11], para el censo de 2005 ascendió a 865,962 y finalmente en el 2010 a 936,823 personas. Con base en tales datos se estimó entonces el comportamiento de la población a lo largo de los años 2003-2009, los resultados se resumen en la Tabla 1. Así, en conjunto con los indicadores de consumo de naranja por habitante se estima la naranja consumida para el municipio. [12]

Tabla 1. Concentrado de información producción-consumo del municipio de Mexicali

| Año   | Población (hab) | Consumo Per cápita Nacional (kg/hab/año) | Consumo (Ton/año) | Producción (Ton/año) |
|-------|-----------------|--|-------------------|----------------------|
| 2003  | 859,907         | 38.0                                     | 32,676.48         | 6,769                |
| 2004  | 879,343         | 38.7                                     | 34,030.56         | 4,679                |
| 2005  | 895,962         | 39.7                                     | 35,569.69         | 7,735                |
| 2006  | 909,766         | 39.7                                     | 36,117.71         | 7,441                |
| 2007  | 920,754         | 40.1                                     | 36,922.25         | 6,192                |
| 2008  | 928,927         | 37.2                                     | 34,556.09         | 3,468                |
| 2009  | 934,284         | 38.9                                     | 36,343.66         | 3,018                |
| Media |                 | 38.9                                     | 35,173.78         | 5,614                |

Tomando en cuenta los valores de producto cultivado así como la cantidad de naranja que se consume en Mexicali, es posible estimar la cantidad de materia disponible en la región, la cual generará el residuo de cáscara de naranja para su posterior procesamiento en AEN. En 2009 con la cantidad de naranja producida en México existió un potencial de 3000 toneladas de AEN con un rendimiento aproximado del 0.3% [10]. Este valor se tomó como el mínimo rendimiento de producción de AEN. A pesar de que México produce AEN, es necesario realizar importaciones del orden de los 378.54 toneladas, al año para satisfacer la demanda nacional [11].

En la Figura 6 se muestran las 3 partes principales que constituyen a la naranja [13]: cáscara de naranja o membrana carpelar (22.11% - 26.80% w/w); albedo (sección blanca después de la cáscara: 10.89% - 13.20% w/w) y pulpa (60% - 67% w/w).

547

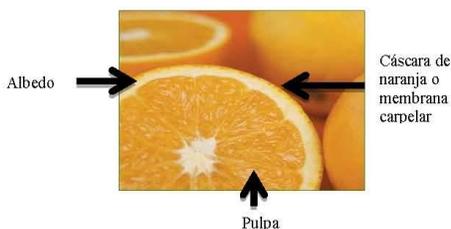


Figura 6. Esquema de las 3 principales partes de la naranja

Dado que el comportamiento de la producción de naranja tanto a nivel municipal como a nivel nacional difiere año con año, se tomaron las cifras del último año reportado, es decir el 2009.

### 4. Resultados y discusiones

La Tabla 2 muestra los resultados de potencial de producción anual de AEN en Mexicali.



Tabla 2. Potencial de producción anual de aceite esencial en Mexicali

| Descripción                                  | Naranja Disponible (Ton/año) | Ton Aceite esencial |
|--|------------------------------|---------------------|
| En base a la naranja cultivada en la región. | 3,018.25                     | 2 - 2.42            |
| En base a la naranja cultivada e importada   | 36,343.66                    | 24.11 - 29.22       |

Lo anterior se traduce en una producción potencial mínima de 2 - 2.42 toneladas de AEN al año usando como base únicamente la naranja cultivada en la región.

### 5. Conclusiones

La utilización de la cáscara de naranja residual, constituye una oportunidad para reconvertir residuos en materia prima de gran utilidad para la obtención de aceite esencial, particularmente el D-Limoneno.

Cabe destacar que aunque este aceite esencial es producido en México, es necesario importar 378.54 toneladas para satisfacer la demanda nacional.

De llevarse a cabo tal recuperación tan sólo en el residuo generado correspondiente al Valle de Mexicali, se reducirían las importaciones de AEN equivalentes a un importe de 31,704 dólares.

Cabe mencionar que a partir de experimentación realizada, se incrementó de manera sustancial la cantidad de aceite esencial recuperado de los residuos.

### Referencias Bibliográficas

[1] D.O.F. *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*, 28-01-2011

[2] D.O.F. *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*, 19-06-2007

[3] Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Abril 2011. [www.inafed.gob.mx](http://www.inafed.gob.mx)

[4] Centro Nacional de Metrología. Abril 2011. [www.cenam.mx](http://www.cenam.mx)

[5] Kanerva S. "Plant secondary compounds and soil microbial processes in carbon and nitrogen cycling in relation to tree species", *Department of Applied Chemistry and Microbiology, Faculty of Agriculture, University of Helsinki* pp. 10-14

[6] Yáñez Rueda X, Lugo Mancillo L, Parada Parada D. Y. "Estudio del aceite esencial de la cascara de la naranja dulce (Citrus Sinensis, variedad Valenciana) Cultivada en Labateca (Norte de Santander Colombia)", *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas. Año/Vol 5 num 001 Universidad de Pamplona, Bucaramanga, Colombia*, pp. 6-7.

[7] Husnu Can Baser, K., Buchbauer G. "Handbook of essential oils, Science Technology, and applications." pp. 119-141.

[8] Giovanni D. Di Giacom A. Citrus. "The genus citrus, Medicinal and aromatic plants, industrial profile". 2002 Taylor & Francis. 642 paginas.

[9] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Abril 2011. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx)

[10] Asociación Nacional de Procesadores de Cítricos, "El uso de agroquímicos ante la problemática internacional de los residuos."

[11] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Abril 2011. [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)

[12] Monografía Naranja, Financiera Rural, Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial (2009)

[13] U.S.D.A. Abril 2011. [www.ars.usda.gov/is/espanol/kids/smalltown/story1/sp.smalltown](http://www.ars.usda.gov/is/espanol/kids/smalltown/story1/sp.smalltown)





## Dimensionamiento y construcción de un equipo para la extracción de aceites esenciales

Conrado García\*, Gisela Montero, Marcos A. Coronado, Armando Pérez

\*cnrdgarcia@gmail.com

### Abstract

Baja California, Mexico has a large variety of plant material feasible for the extraction of essential oils, which usually is wasted by the lack of knowledge of both the equipment used and the most appropriate extraction technique. Therefore, it is developing a prototype for essential oils of eucalyptus, ricinus communis and orange leaves. This paper discloses the results of sizing and construction of the prototype for the extraction of essential oils, using steam water as drag fluid. To calculate the dimensions of the extraction equipment were conducted laboratory tests and empirical values were taken of the diameter/height ratio. With such dimensioning, structural simulation was carried out in order to determine optimum type and amount of material for its construction. The equipment was constructed of stainless steel with 3 kg of material process capacity, and is packaged to operate with steam water and organic solvents. The body was designed to feed the drag fluid at the bottom and it was isolated to prevent heat loss.

**Keywords:** Essential oil, sizing, steam distillation, extraction equipment.

### Resumen

Baja California, México cuenta con una gran variedad de material vegetal factible para la extracción de aceites esenciales, el cual generalmente, es desaprovechado por el desconocimiento, tanto del equipo a utilizar como de la técnica de extracción más apropiada. Por ello, se está desarrollando un prototipo para obtener aceites esenciales de eucalipto, higuera y de hojas de cítricos. En este trabajo se dan a conocer los resultados del dimensionamiento y construcción del prototipo para la extracción de aceites esenciales, que utiliza como fluido de arrastre vapor de agua. Para calcular las dimensiones del equipo extractor se realizaron pruebas de laboratorio y se tomaron valores empíricos de las relaciones diámetro/altura. Con tal dimensionamiento, se efectuó una simulación estructural con la finalidad de determinar tipo y cantidad óptima de material para su construcción. El equipo se construyó de acero inoxidable y tiene la capacidad para procesar aproximadamente 3 kg de material acondicionado para operar con vapor de agua y solventes orgánicos. En el diseño del cuerpo extractor se consideró el suministro del fluido de arrastre por la parte inferior así como el aislamiento del mismo para evitar pérdidas de calor.

**Palabras clave:** Aceite esencial, dimensionamiento, arrastre de vapor, equipo de extracción.



## 1. Introducción

Los aceites esenciales (AE) son mezclas líquidas volátiles de varias sustancias químicas biosintetizadas por las plantas, responsables del aroma característico. Generalmente son mezclas complejas de hasta más de 100 componentes, cuyo grupo funcional es el terpeno [1]. Tales aceites se pueden extraer mediante diferentes métodos como: prensado, destilación por arrastre de vapor de agua, extracción con solventes volátiles y fluidos supercríticos.

Los procesos de extracción de los aceites esenciales son diversos, de ello depende la combinación del equipo, fluido de arrastre, condiciones de operación y en especial el compuesto de interés el cual se desea obtener.

Actualmente es bien conocida y está documentada la existencia de equipos extractores de sustancias volátiles, como en el presente caso de aceites esenciales, siendo uno de los primeros el alambique, que es una evolución de la alquitara y se caracteriza por ser un vaso con una especie de cañón torcido en muchas vueltas que termina en un tubo que se refrigera sumergiéndolo en agua fría para condensar el vapor y posteriormente, por diferencia de densidades se separan el aceite esencial y el condensado. Este es uno de los métodos más antiguos empleado por el ser humano para la separación líquido-gas en materia sólida.

A nivel laboratorio uno de los equipos más utilizados es el Clevenger, considerado en varios estándares internacionales, como el más adecuado para la extracción de la mayor parte del aceite esencial de una planta aromática. Está compuesto de un balón, donde se deposita la materia prima molida y una cantidad conocida de agua pura.

La diferencia del equipo Clevenger con el equipo propuesto en este artículo, es la capacidad de procesamiento. El equipo propuesto tiene una mayor capacidad de procesamiento de material vegetal, además que el equipo Clevenger tiene el suministro de fluido de arrastre de forma externa por la parte superior conducida al fondo del mismo y en el equipo propuesto tiene suministro de forma externa por la parte inferior [2], pero de igual forma puede trabajar con la técnica de hidrodestilación e hidroextracción.

El presente trabajo describe el diseño de un extractor de aceites esenciales y compuestos orgánicos similares, a partir de diversas partes físicas de una amplia gama de especies vegetales. El extractor de aceites esenciales está diseñado de tal forma que puede operar a presión atmosférica, así como a presiones ligeramente por abajo o por encima de la presión atmosférica. A esta unidad se le puede suministrar energía proveniente de desechos agrícolas, biocombustibles, combustibles derivados del petróleo o cualquier otra fuente de energía. Requiere un mínimo de personal y atención para su correcto funcionamiento y operación.

Además de utilizar vapor de agua como fluido de arrastre, también pueden utilizarse solventes orgánicos de polaridad diversa, dependiendo del compuesto orgánico que se desee extraer.

## 2. Materiales y Métodos

Una vez definida la técnica de extracción por vapor de agua, como la adecuada para el material vegetal o el compuesto de interés a extraer, se hicieron las siguientes consideraciones:

### 2.1. Descripción del proceso

La técnica de extracción de aceite esencial que utiliza agua como fluido de arrastre en forma de vapor y la interacción de éste con el material vegetal, recibe diversos nombres, los cuales pueden ser: destilación por arrastre de vapor, extracción por arrastre, hidrodestilación, hidrodifusión o hidroextracción. Sin embargo, no existe un nombre claro y conciso para denominarla, debido a que se desconoce exactamente lo que sucede en el interior del equipo principal y porque se usan diferentes condiciones del vapor de agua para el proceso de extracción. Es así que, cuando se usa vapor saturado o sobrecalentado, fuera del equipo principal, es llamada “destilación por arrastre de vapor” [3]. Cuando se usa vapor saturado, pero la materia prima está en contacto íntimo con el agua generadora del vapor, se le llama “hidrodestilación” [4].

Cuando se usa vapor saturado, pero la materia no está en contacto con el fluido en estado líquido, sino con un reflujo del condensado formado en el interior del destilador y se asume que el fluido condensado es el agente extractor, se le denomina “hidroextracción” [5,6]. Las técnicas anteriormente descritas se explican de manera gráfica en la figura 1.

Cuando se utiliza algún solvente orgánico en sustitución del agua como fluido de arrastre y además se utiliza el mismo equipo de extracción, a la técnica se le denomina “extracción con solvente orgánico” y por ende las condiciones de trabajo serán distintas a las utilizadas con vapor de agua así como los resultados.

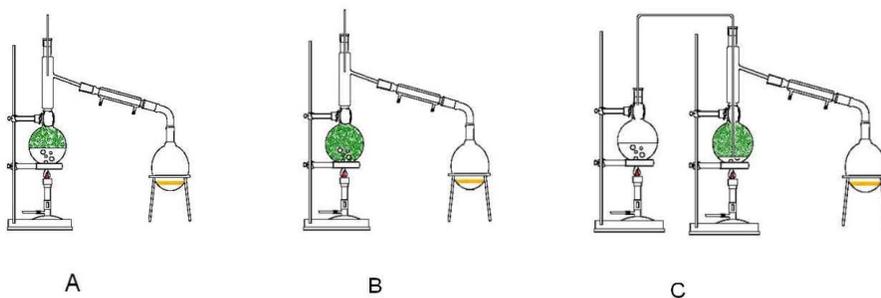


Figura 1. Condiciones de vapor de agua en el proceso de extracción de aceite esencial; A) Hidroextracción, B) Hidrodestilación, C) Destilación por arrastre de vapor. (Fuente: Elaboración propia).

## 2.2. Desarrollo teórico del concepto de extracción de aceites esenciales

En la destilación por arrastre con vapor de agua, la muestra vegetal generalmente fresca y cortada en trozos pequeños, se coloca en un recipiente cerrado y sometida a una corriente de vapor de agua sobrecalentado, el tiempo suficiente para que las glándulas vegetales que contienen el tejido vegetal se rompan, liberando el aceite esencial, el cual presenta, como es de esperarse, su correspondiente presión de vapor a estas condiciones. La esencia así arrastrada, es insoluble en agua, propiedad que es aprovechada después del condensador, en el separador donde se forman dos fases: una de aceite esencial y otra de agua, lo cual facilita la separación del aceite de la fase acuosa, por diferencia de densidades. Esta tecnología, se aplica a nivel industrial debido al rendimiento comparable al obtenido con otras técnicas, a la pureza del aceite obtenido y porque no requiere equipo sofisticada. Los rendimientos de la extracción de aceite esencial, por la técnica de destilación por arrastre, no son cantidades constantes, debido a diversos factores que influyen, entre los que se pueden mencionar: contenido de aceite esencial en la planta, época en que se realiza la cosecha y frescura de la hoja al momento de procesar la hoja, entre otros. El rendimiento puede variar entre 1 a 5% del peso del material a procesar.

## 2.3. Condiciones de diseño del equipo extractor

En el dimensionamiento del equipo extractor se consideró una relación empírica altura (H) y (diámetro)  $H/D = 1.3$  [5] y un volumen de 20 litros, para procesar 3 kg de material vegetal. La Tabla 1 lista el resto de las condiciones consideradas para el equipo construido.

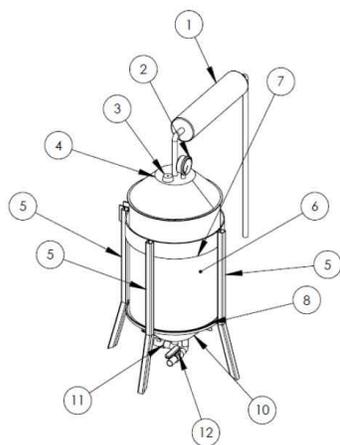
Tabla 1. Condiciones de diseño del equipo piloto de extracción de aceites esenciales.

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Modo de operación     | Por lote               |
| Material del equipo   | Acero inoxidable       |
| Suministro de vapor   | Externo                |
| Calidad de vapor      | Saturado               |
| Contenido de AE       | 1-5 %                  |
| Volumen del equipo    | 20 litros              |
| Densidad de operación | 1800 kg/m <sup>3</sup> |

## 3. Resultados y Discusión

El equipo extractor se diseñó para trabajar con aproximadamente 3 kg de material vegetal cuenta con un volumen de operación de 20 litros. El equipo construido cuenta con una relación  $H/D = 1.5$  un poco superior a lo recomendado por la literatura, con la finalidad de hacer pruebas con diferentes cantidades de material vegetal y determinar el rendimiento para después comparar resultados a diferentes alturas, haciendo una analogía de este proceso con una torre empacada.

Las figuras 2 y 3 muestran diferentes vistas del equipo construido.



| NÚMERO | DESCRIPCIÓN               |
|--------|---------------------------|
| 1      | Condensador               |
| 2      | Manómetro                 |
| 3      | Válvula de seguridad      |
| 4      | Tapadera superior         |
| 5      | Pata de estructura        |
| 6      | Cuerpo                    |
| 7      | Sujetador                 |
| 8      | Asiento                   |
| 9      | Parrilla                  |
| 10     | Tapadera inferior         |
| 11     | Válvula entrada de vapor  |
| 12     | Válvula salida de líquido |

Figura 2. Vista de las partes que componen al equipo extractor de aceites esenciales.  
(Fuente: Elaboración propia).



Figura 3. Vista isométrica del equipo extractor de aceites esenciales.  
(Fuente: Elaboración propia).



#### 4. Conclusiones y Recomendaciones

El dimensionamiento y simulación estructural del equipo extractor, permitieron determinar el tipo y la cantidad óptima de material para su construcción. El equipo se construyó de acero inoxidable, para procesar aproximadamente 3 kg de material vegetal y está acondicionado para operar con vapor de agua y solventes orgánicos, como fluidos de arrastre. Así mismo, se plantearon diversas modificaciones del equipo extractor, con la finalidad de mejorar el contacto del fluido de arrastres con el material vegetal, entre tales modificaciones se propuso que la alimentación del fluido se efectuara por la parte inferior del cuerpo extractor.

Se recomienda que antes de efectuar las extracciones del aceite esencial al material vegetal de interés, se realice un diseño de experimentos donde se tomen en consideración variables tales como frescura del material vegetal, flujo de vapor de arrastre, tiempo de extracción, tamaño del material vegetal y densidad de operación entre otras, para determinar las condiciones más adecuadas acordes al material vegetal a procesar. Posteriormente, se recomienda una evaluación cuantitativa para analizar el rendimiento del producto obtenido y un análisis de GC-MS (Cromatografía de Gases – Espectrometría de Masas), para determinar la calidad del mismo.

#### Agradecimientos

Conrado García agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para cursar el postgrado, así como al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California por las facilidades para la realización del presente proyecto.

#### Referencias

- [1] Husnu K. “Chemistry of esencial oils” Department of pharmacognosy, Anadolu University, Eskysehir, Turkey, 2008.
- [2] García, G., Montero, G., Pérez, A., Coronado, M. “*Extractor de aceites esenciales*” Patente en trámite registro IMPI No. MX/a/2010/012154, México, 2010.
- [3] Günther, E. “*The Essential Oils. Vol. 1: History and origin in Plants Production Analysis*”, 1948
- [4] Palomino, A. “*Modelamiento de la hidroextracción de aceites esenciales*”. Memorias de la VI Reunión del Programa Nacional de Fenómenos de Transferencia. Universidad Nacional del Callao. Callao, Lima, Perú, 1999.
- [5] Okonkwo, E., “*Design of pilot plant for the production of essential oil from Eucalyptus leaves*” Journal of Scientific & Industrial Research, vol 65, pp. 912-915, 2006.
- [6] Cerpa, M., “*Hidrodestilación de aceites esenciales: modelado y caracterización*”, Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, España, 2007.



## Simulación de un motor de combustión interna utilizando mezcla diesel-biodiesel

Armando Pérez\*, Gisela Montero, Héctor E. Campbell, Conrado García,  
Marcos A. Coronado

\*email: armand\_perez@hotmail.es

### Abstract

This paper presents the results of the simulation of internal combustion engine of three cylinders, working with various diesel-biodiesel blends. The equipment operating conditions were developed in detail using the Aspen® simulator. Diesel specifications were taken from reports of SENER and PEMEX and the properties of biodiesel were determined by the simulator Aspen®. Methyl Ricinoleate was chosen to work as biodiesel and it is obtained from the castor oil (*Ricinus Communis*) processing, which is an endemic plant from the State of Baja California. Its physical properties and chemical structure were defined by user in the simulator. The main aspects of the engine operation were considered, such as: diesel-biodiesel blend, fuel/air ratio, temperature of flue gases and heat load. The following results are presented: CO<sub>2</sub> emissions, steam water, combustion efficiency, yield, heat value of mixtures and fuel consumption.

**Keywords:** Simulation, Aspen, biodiesel, combustion, emissions

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de la simulación de un motor de combustión interna de tres cilindros, trabajando con distintas mezclas diesel-biodiesel. Se desarrollaron de manera detallada las condiciones de funcionamiento del equipo utilizando el simulador Aspen®. Las especificaciones del diesel se tomaron de los reportes de PEMEX y SENER y las propiedades del biodiesel se determinaron mediante el simulador Aspen®. Para simular el biodiesel se utilizó el metil ricinoleato, obtenido del procesamiento del aceite de higuera (*Ricinus Communis*), planta autóctona de Baja California. Sus propiedades físicas y químicas fueron definidas por usuario, con apoyo del simulador. Se consideraron los principales aspectos de las condiciones de operación del motor tales como: relación diesel-biodiesel, mezcla aire/combustible, temperatura de los gases de combustión y carga térmica obtenida. Los resultados muestran las emisiones de CO<sub>2</sub> y vapor de agua, eficiencia de combustión, rendimiento, poder calorífico de las mezclas y consumo de combustible.

**Palabras clave:** Simulación, biodiesel, combustión interna, Aspen®, emisiones



## 1. Introducción

En los últimos años, el mundo se ha enfrentado a una crisis energética, que ha puesto en perspectiva la dependencia energética de los combustibles derivados del petróleo, los cuales son cada vez más escasos y su uso se asocia con el incremento de los problemas ambientales [1]. Para superar el aumento de la demanda de energía y la reducción de las reservas de petróleo, los biocombustibles surgen como una alternativa viable y sustentable de sustituir de manera gradual a los combustibles convencionales. Un par de ejemplos de biocombustibles capaz de emplearse en el sector transporte son el biodiesel y bioetanol.

La importancia del biodiesel se ha señalado en obras recientes [2-7], es una alternativa interesante como combustible para el motor diesel. El biodiesel se puede obtener de fuentes renovables, como aceites vegetales o grasas animales, a través de un proceso de transesterificación. La principal razón por la cual es necesario llevar a cabo el proceso de transesterificación de los aceites para su conversión a biodiesel, es reducir su viscosidad y aumentar su poder calorífico, obteniendo propiedades similares a las del diesel. Entre las ventajas principales del biodiesel destacan su origen renovable, biodegradabilidad, bajas emisiones de SOx y CO<sub>2</sub>, además presenta buenas características lubricantes y tiene un punto de inflamación superior al diesel. Por otro lado, se puede encontrar en la literatura la mención de algunos problemas técnicos relacionados con su uso, tales como el aumento de las emisiones de NOx en comparación con diesel.

El propósito de un motor de combustión interna es la producción de energía mecánica a partir de la energía química almacenada en el combustible. En los motores de combustión interna, la energía se libera mediante el encendido y la oxidación del combustible dentro del motor, a diferencia de los de combustión externa como, por ejemplo, un horno industrial o una caldera. El fluido de trabajo cambia su composición química después de la combustión, es el encargado de transferir el trabajo al pistón y este último al resto de los componentes de la cadena cinemática, hasta llegar finalmente a las ruedas impulsoras del movimiento [8]. Tal fenómeno de combustión fue simulado en ASPEN® junto con una serie de consideraciones relevantes para tal proceso, utilizando como combustible diesel y biodiesel así como una mezcla de ambas.

### 2.1.1. Ciclo diesel ideal

El motor ECOM (Encendido por Compresión), fue propuesto por Rudolph Diesel en la década de 1890. Un ciclo Diesel ideal es un modelo simplificado de lo que ocurre en un motor diesel. En un motor de esta clase, a diferencia de lo que ocurre en uno de gasolina, la combustión no se produce por la ignición de una chispa en el interior de la cámara. En su lugar, aprovechando las propiedades químicas del diesel, el aire es comprimido hasta una temperatura superior a la de autoignición del diesel y el combustible es inyectado a presión en este aire caliente, produciéndose la combustión de la mezcla [9]. Puesto que solo se comprime aire, la relación de compresión (cociente entre el volumen en el punto más bajo y el más alto del pistón) puede ser mucho más alta que la de un motor de gasolina (que tiene un límite, por ser indeseable la autoignición de la mezcla). La relación de compresión de un motor diesel puede oscilar entre 12 y 24, mientras que el de gasolina puede rondar un valor

de 8. Para modelar un ciclo ideal diesel se consideran 4 escenarios, 1) Compresión, proceso 1-2: es un proceso de compresión adiabática reversible (isentrópica), 2) Combustión, proceso 2-3: en esta idealización, el aporte de calor se simplifica por un proceso isóbaro (a presión constante), 3) Expansión, proceso 3-4: se simplifica por una expansión isentrópica (adiabática), 4) Escape, proceso 4-1: esta etapa es un proceso isocórico (escape) es decir a volumen constante [10].

## 2. Materiales y Métodos

En el presente trabajo se utilizó el software Aspen®, el cual es una herramienta que permite simular y realizar un análisis de procesos. Con el apoyo del software se simuló el proceso de combustión, considerando las condiciones de operación de un motor diesel de 3 pistones, mostradas en la tabla 1, que se estará comparando con el equipo experimental que se ilustra en la figura 2 [11]. El motor fue operado con diesel y B20 (80% diesel 20% biodiesel). En la simulación se realizaron corridas con diesel, biodiesel y B20 en las cuales se utilizó una relación estequiométrica aire-combustible y como información adicional se alimentaron los datos de temperatura de gases de combustión y presión de operación de la cámara de combustión. Se realizaron 3 escenarios de simulación: escenario 1 (diesel), escenario 2 (biodiesel) y escenario 3 (B20).

Tabla 1. Descripción del motor diesel tomado como referencia

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| Especificación         | KUBOTA D600-B             |
| Tipo                   | Diesel, inyección directa |
| Alimentación           | Presión atmosférica       |
| Desplazamiento         | 600 cc                    |
| Configuración          | 3 Cilindros en línea      |
| Diámetro X Carrera     | 64 X 62.2                 |
| Relación de compresión | 18                        |
| Consumo                | 0.48 Lts/h                |



Figura 2. Motor diesel 3 pistones

Las especificaciones de las condiciones de entrada se muestran en la tabla 2. Estos valores se utilizaron como datos de entrada al software, para realizar las corridas con los tres escenarios.

Tabla 2. Condiciones de alimentación del simulador para trabajar con combustibles a 25 C y 1 atm.

| Flujo másico (kg/h) | Diesel |        | Biodiesel |           | Mezcla B20 |      |           |        |
|---------------------|--------|--------|-----------|-----------|------------|------|-----------|--------|
|                     | Aire   | Diesel | Aire      | Biodiesel | Aire       | B-20 | Biodiesel | Diesel |
| M-Ricino            | -      | -      | -         | 0.40      | -          | 0.08 | 0.08      | -      |
| Diesel              | -      | 0.40   | -         | -         | -          | 0.32 | -         | 0.32   |
| Oxígeno             | 2.44   | -      | 1.15      | -         | 1.36       | -    | -         | -      |
| Nitrógeno           | 8.05   | -      | 4.36      | -         | 5.13       | -    | -         | -      |

## 2.1. Condiciones de la simulación

El simulador ASPEN® es una herramienta de gran utilidad, entre otros para la simulación del proceso de combustión, como es el presente caso. Para la presente simulación se tomó como referencia el biodiesel de higuera, para analizar su comportamiento [12]. La figura 2 muestra el diagrama simplificado que se desarrolló para la simulación. Fue necesario definir algunos compuestos para utilizarlos en las simulaciones debido a que no se encontraban en las bases de datos del simulador. Se definió el ricinoleato de metilo ( $C_{19}H_{36}O_3$ ) como molécula promedio para el biodiesel, tomando como referencia sus propiedades para introducirlas en el simulador. Para el diesel reportado por PEMEX [13] y SENER [1], se tomó como referencia el  $C_{16}H_{34}$  (N-Hexadecano) como molécula representativa.

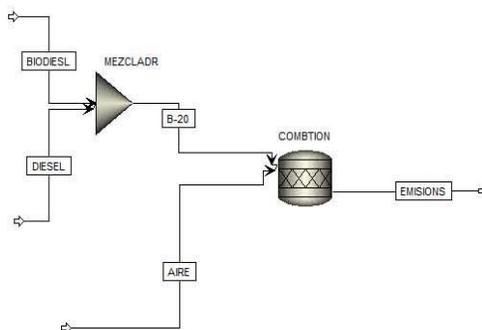


Figura 2. Diagrama simplificado del proceso de combustión.

## 3. Resultados y Discusión

La información esencial para simular el proceso de combustión es la presión sometida por el cilindro al momento de la explosión, temperatura de la cámara de combustión, tipo de combustible, así como su poder calorífico. Estos parámetros fueron utilizados para la

simulación del proceso de combustión ideal en un motor diesel, considerando una eficiencia al 100 %, las condiciones del aire ambiente se establecieron a presión de 1 atm y temperatura de 25°C y las condiciones del reactor se tomaron como 350°C y 4 atm. Los resultados de las simulaciones se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de las simulaciones.

| Flujo másico (kg/h) | Diesel | Biodiesel | B20   |
|---------------------|--------|-----------|-------|
| Agua                | 0.54   | 0.41      | 0.51  |
| Oxígeno             | 1.05   | .07       | 0.04  |
| Dióxido de carbono  | 1.24   | 1.07      | 1.20  |
| Nitrógeno           | 8.05   | 4.36      | 5.13  |
| PCI (MJ/kg)         | 43.95  | 37.08     | 38.45 |
| Potencia (kW)       | 4.13   | 3.31      | 3.99  |

- Los resultados de la potencia para los casos simulados, son congruentes con el menor poder calorífico del biodiesel, lo cual será de utilidad para realizar las pruebas en el equipo experimental.
- La cantidad de oxígeno en la salida de los gases de combustión es mayor en el diesel, en comparación con el biodiesel debido a que el biodiesel es un biocombustible más oxigenado.

Con base en los resultados de la tabla 3 y la figura 1, se observa que las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen cuando se opera con biodiesel 100 %. El poder calorífico inferior del diesel es superior al biodiesel en un 15.63 %, y un 12.51% con respecto al B20. Esta diferencia de poderes caloríficos se ve reflejada en una disminución de potencia del biodiesel en un 20 % y un 3.38 % en el B20, con respecto al diesel.

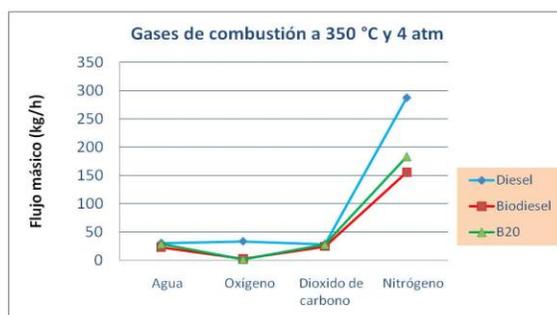


Figura 1- Resultados tabulados de los gases de combustión.

#### 4. Conclusiones y Recomendaciones

El comportamiento de las emisiones que arrojaron las simulaciones, revelan que hay una reducción de CO<sub>2</sub> cuando se trabaja con biodiesel, sin embargo su poder calorífico es inferior al del diesel y se ve reflejado en la disminución de potencia desarrollada. Este resultado indica que para desarrollar la misma potencia que se obtiene con el diesel, se



requerirá de un mayor consumo de biodiesel, pero las emisiones de dióxido de carbono provocadas por el biodiesel se consideran neutras, ya que solo se está concluyendo el ciclo del carbono sin contribuir al calentamiento global.

Se recomienda continuar con la simulación en ASPEN®, utilizando otro tipo de reactores para el proceso de combustión de biodiesel, diesel y mezclas, e ir agregando otros equipos, con la finalidad de crear escenarios más apegados al comportamiento del equipo experimental.

### Agradecimientos

Armando Pérez agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para cursar el posgrado, así como al instituto de ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California por las facilidades para la realización del presente proyecto.

### Referencias

- [1] SENER, “*Prospectiva del mercado de petróleo crudo 2007-2016*”. Consulta en línea: [www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)
- [2] Usta N., “*An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester*”, *Energy Conversion Manage* 46, pp. 2373–2386, 2005.
- [3] Nwafor O.M.I., “*Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature*”, *Biomass and Bioenergy* 27, pp. 507–511. (2004).
- [4] Qiao X. Li, X., Zhang L., Fang J., Huang Z. and Xia H., “*Combustion and emission characteristics of a two-stroke diesel engine operating on alcohol*”, *Renewable Energy* 30 pp. 2075–2084, 2005.
- [5] Carraretto C., “*Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations*”, *Energy* 29, pp. 2195–2211, 2004.
- [6] Kalligeros S., “*An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine*”, *Biomass and Bioenergy* 24, pp. 141–149, 2003.
- [7] Puhan S., “*Mahua oil (madhuca indica seed oil) methyl ester as biodiesel preparation and emission characteristics*”, *Biomass Bioenergy* 28 .pp. 87–93, 2005.
- [8] Ramadhas A.S., “*Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil*”, *Renewable Energy* 30 pp. 1789–1800, 2005.
- [9] Cengel Y. A., Boles M. A., “*Termodinámica*”, Sexta edición (2009).
- [10] Hamdan M. A., Runa Haj Khalil, “*Simulation of compression ignition engine powered by biofuels*”, Department of Mechanical engineering-University of Jordan. Department of Mechanical engineering-Philadelphia University. 2005
- [11] Hilbert, J. A., Tesouro, M. O., Aucana, M.O., Pincu, M,S. “*Rendimiento comparativo de biodiesel y gasoil en tractores agrícolas*”
- [12] Agudelo, A., Agudelo, J., Benjumea, P. “*Diagnóstico exergético del proceso de combustión en un motor Diesel*”. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Núm. 45, septiembre, 2008, pp. 41-53. Universidad de Antioquia Colombia
- [13] PEMEX. Consulta en <http://www.pemex.com/>