



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

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE DETERMINACIÓN DE LAS MEZCLAS ÓPTIMAS DE
ETANOL ANHIDRO EN GASOLINA Y BIODIESEL EN ACEITE COMBUSTIBLE DIESEL, PARA
USO EN EL TRANSPORTE, EN BASE A LAS ESPECIFICACIONES LEGALES DE CALIDAD**

Michelle Marie Lara Ozaeta

Asesorada por el Msc. Ing. Byron de Jesús López Maldonado

Guatemala, febrero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE DETERMINACIÓN DE LAS MEZCLAS ÓPTIMAS DE
ETANOL ANHIDRO EN GASOLINA Y BIODIESEL EN ACEITE COMBUSTIBLE DIESEL, PARA
USO EN EL TRANSPORTE, EN BASE A LAS ESPECIFICACIONES LEGALES DE CALIDAD**

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MICHELLE MARIE LARA OZAETA

ASESORADO POR EL MSC. ING. BYRON DE JESÚS LÓPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

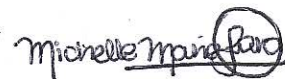
| | |
|-------------|-----------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADORA | Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña |
| EXAMINADOR | Ing. José Manuel Tay Oroxom |
| EXAMINADOR | Ing. Otto Raúl de León de Paz |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE DETERMINACIÓN DE LAS MEZCLAS ÓPTIMAS DE ETANOL ANHIDRO EN GASOLINA Y BIODIESEL EN ACEITE COMBUSTIBLE DIESEL, PARA USO EN EL TRANSPORTE, EN BASE A LAS ESPECIFICACIONES LEGALES DE CALIDAD

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Posgrado, con fecha 22 de enero de 2013.



Michelle Marie Lara Ozaeta

Universidad de San Carlos
de Guatemala



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

ADSE-MEAPP-0003-2013

Guatemala, 22 de enero de 2013.

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

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Michelle Marie Lara Ozaeta** con carné número **2004-19657**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**.

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

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"

Msc. Ing. Byron de Jesús López M.
Asesor (a)

MSC Ing. Byron Lopez Maldonado
Ingeniero Químico
Colegiado Activo No. 1066

Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

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



Cc: archivo
/la



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **MICHELLE MARIE LARA OZAETA** titulado: **"DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE DETERMINACIÓN DE LAS MEZCLAS ÓPTIMAS DE ETANOL ANHIDRO EN GASOLINA Y BIODIESEL EN ACEITE COMBUSTIBLE DIESEL, PARA USO EN EL TRANSPORTE, EN BASE A LAS ESPECIFICACIONES LEGALES DE CALIDAD"**.
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale



DTG. 071.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE DETERMINACIÓN DE LAS MEZCLAS ÓPTIMAS DE ETANOL ANHIDRO EN GASOLINA Y BIODIESEL EN ACEITE COMBUSTIBLE DIESEL, PARA USO EN EL TRANSPORTE, EN BASE A LAS ESPECIFICACIONES LEGALES DE CALIDAD**, presentado por la estudiante universitaria: **Michelle Marie Lara Ozaeta**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 11 de febrero de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el máximo Creador, mi Padre, quien ha caminado conmigo a lo largo de toda mi vida, brindándome la fortaleza para salir adelante siempre, y la entereza de espíritu para luchar por lograr mis sueños y metas.
- Mis padres** Francisco Lara y Giselle de Lara; porque todo lo que soy se lo debo a su sacrificio y esfuerzo, por su lucha constante para proveer a sus hijos, por su apoyo continuo, por compartir mis penas y mis alegrías, por hacer de mí una mujer fuerte y emprendedora.
- Mis abuelos** Martha de Ozaeta (q.e.p.d.) y Luis Felipe Lara (q.e.p.d.); por su apoyo invaluable e incomparable durante el tiempo que Dios me permitió compartir a su lado.
- Mi esposo y mi hijo** Manuel Juárez y Santiago, por su amor y compañía, por proveerme la fortaleza para luchar incansablemente.
- Mis amigos** Por todo el apoyo, cariño y compañerismo brindado a lo largo de este camino.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de
San Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios.

La Facultad de Ingeniería

Por brindarme todos los recursos físicos y humanos para obtener la mejor educación.

**La Escuela de
Ingeniería Química**

Por mi excelente formación académica.

Mi asesor

Msc. Ing. Byron de Jesús Maldonado, por sus conocimientos y tiempo brindado.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| OBJETIVOS..... | VII |
| RESUMEN..... | IX |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. ANTECEDENTES | 5 |
| 3. ALCANCES DEL TEMA | 7 |
| 4. JUSTIFICACIÓN | 9 |
| 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 13 |
| 6. MARCO TEÓRICO..... | 17 |
| 6.1. Cambio climático | 17 |
| 6.2. Combustibles renovables y biocombustibles | 18 |
| 6.3. Etanol | 18 |
| 6.4. Etanol en Guatemala..... | 19 |
| 6.5. Biodiesel en Guatemala..... | 19 |
| 6.6. Propiedades fisicoquímicas de la gasolina | 21 |
| 6.6.1. Azufre total..... | 21 |
| 6.6.2. Presión de vapor..... | 21 |
| 6.6.3. Destilación a presión atmosférica | 22 |
| 6.6.4. Azufre mercaptano | 23 |

| | | |
|--------|---|----|
| 6.6.5. | Prueba Doctor | 23 |
| 6.6.6. | Corrosividad del cobre | 24 |
| 6.6.7. | Grados API..... | 24 |
| 6.6.8. | Contenido de gomas | 25 |
| 6.6.9. | Número de octano RON..... | 25 |
| 6.7. | Parámetros fisicoquímicos del diésel | 25 |
| 6.7.1. | Punto de congelamiento (<i>pourpoint</i>) y punto de enturbiamiento (<i>cloudpoint</i>) | 26 |
| 6.7.2. | Punto <i>flash</i> | 26 |
| 6.7.3. | Número de cetano..... | 26 |
| 6.7.4. | Viscosidad cinemática..... | 27 |
| 7. | HIPÓTESIS..... | 29 |
| 8. | MÉTODOS Y TÉCNICAS | 33 |
| 8.1. | Procedimiento | 33 |
| 8.2. | Variables e indicadores..... | 33 |
| 8.3. | Metodología experimental..... | 37 |
| 8.4. | Resultados esperados..... | 40 |
| 9. | RECURSOS NECESARIOS | 45 |
| 9.1. | Laboratorio de ensayo..... | 45 |
| 9.2. | Recursos materiales..... | 45 |
| 9.3. | Equipo | 47 |
| 9.4. | Cristalería..... | 48 |
| 9.5. | Recursos humanos | 49 |
| 9.6. | Cuantificación de costos | 50 |
| 9.6.1. | Evaluación de parámetros fisicoquímicos mezclas diesel/biodiesel..... | 50 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| 9.6.2. | Evaluación parámetros fisicoquímicos mezclas gasolina/etanol carburante | 51 |
| 9.6.3. | Cálculo del costo de evaluación de hidrocarburos aromáticos y olefinas | 52 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 55 |
| APÉNDICE..... | | 61 |
| ANEXO | | 65 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Presiones de vapor comparativas (RVP) para gasolinas aditivas con diferentes oxigenantes. Metanol, metanol/alcohol t-butílico (TBA), etanol, metil t-butil éter (MTBE) 22
2. Enlace químico en azufre mercaptano (tioles) 23
3. Guía para la evaluación del grado de corrosión en la tira de cobre 24
4. Diagrama de flujo de trabajo, evaluación de muestras gasolina-etanol carburante 38
5. Diagrama de flujo de evaluación de muestras de diésel-biodiésel 39

TABLAS

- I. Especificaciones de calidad para gasolina regular 34
- II. Especificaciones de calidad para aceite combustible diesel 2-D 35
- III. Cálculo del costo de evaluación de número de octano RON 52
- IV. Tabla final de costos para parámetros fisicoquímicos en mezclas 53

OBJETIVOS

General

Establecer las mezclas óptimas de biodiesel derivado de piñón (*Jatropha curcas*) en diesel derivado de petróleo, y de etanol derivado de melazas de caña en gasolina destilada de petróleo, mediante la caracterización fisicoquímica de las distintas mezclas a preparar con base en el cumplimiento de las especificaciones de calidad para aceite combustible para motor diesel y gasolina superior, respectivamente, establecidas por el Ministerio de Energía y Minas, ente rector en hidrocarburos.

Específicos

1. Estudiar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de calidad de las mezclas y determinar cuáles son los parámetros que presentan mayor sensibilidad a la adición del biocombustible, sea en una relación directa o inversamente proporcional al porcentaje de biocombustible agregado.
2. Evaluar la calidad de ignición o índice de cetano de las mezclas de biodiesel en diesel, en función de los parámetros Gravedad API y temperatura de destilación del 50% del combustible.

3. Analizar la relación existente entre la corrosividad de las mezclas de biodiesel en diesel hacia el cobre, la concentración de azufre en el combustible y el contenido de agua y sedimentos.

4. Determinar la calidad de combustión de las diferentes mezclas de etanol anhidro en gasolina, en función del incremento en el número de octano de cada mezcla.

RESUMEN

A través del presente trabajo de investigación se pretende contribuir a la promoción de sistemas de transporte más sustentable en el país, impulsando la utilización de biocombustibles en el sector de transporte en Guatemala, dadas las notables ventajas existentes localmente, tales como la producción de etanol de la agroindustria azucarera con mayor productividad a nivel regional, y poseer suelos idóneos para el cultivo de oleaginosas a partir de cuyos aceites es posible obtener biodiesel.

El aceite combustible diesel es el principal producto de importación, seguido por la gasolina; la importación de los derivados de petróleo impone una presión económica sobre el país, colocándolo en una posición de vulnerabilidad antes los fluctuantes precios del crudo. El proyecto presentado a continuación, tiene como finalidad promover la investigación y desarrollo de la utilización de biocombustibles; constituir una herramienta para la promoción del uso de combustibles renovables en los sistemas de transporte en Guatemala, que a su vez promoverá el desarrollo energético sostenible, apoyar a la diversificación de la matriz energética nacional y contribuir a la mitigación de la gran amenaza mundial que constituye el fenómeno de cambio climático.

En esta investigación se elaborarán diferentes mezclas porcentuales de biocombustible en combustible fósil, para establecer las mezclas óptimas de etanol en gasolina y biodiesel en diesel de petróleo, para su uso en el transporte en Guatemala. La determinación se realizará con base en el cumplimiento de las características fisicoquímicas de calidad establecidas por el MEM en la Nómina de Productos Petroleros, Acuerdo Ministerial 363-2009.

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de energía renovable pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases de invernadero de los sistemas convencionales que utilizan combustibles fósiles. En países con economías de orientación agrícola, como en Guatemala, el uso apropiado de la biomasa ofrece una alternativa para reducir la presión económica que impone la importación de los derivados del petróleo.

Del volumen total de derivados de petróleo que se importan en Guatemala, el diesel es el principal producto de importación con un volumen equivalente al 36,38% de las importaciones, seguido por la gasolina, con un volumen equivalente del 31,12% de las importaciones (Ministerio de Energía y Minas, 2010). En Guatemala no existe reglamentación ni un marco jurídico legal para la utilización de los biocombustibles, a pesar de las ventajas que le confieren sus suelos idóneos para el cultivo de oleaginosas para la producción de biodiesel, y el ser poseedor de la agroindustria azucarera con mayor productividad en la región.

En Guatemala el etanol se hace principalmente a partir de melaza de caña de azúcar por lo cual esta no compite con la producción de azúcar. Actualmente se produce con fines industriales y no existe consumo nacional de etanol como combustible vehicular. En cuanto a la industria del biodiesel, ésta es reciente en el país, por lo que la producción es a pequeña escala y principalmente para autoconsumo en motores estacionarios.

La Universidad del Valle de Guatemala, Universidad Galileo y Biocombustibles de Guatemala, son algunas de las entidades que realizan proyectos de biodiesel en la actualidad (Asociación de Combustibles Renovables Guatemala, 2008). Existen otras industrias alimenticias que han implementado proyectos de producción de biodiesel para autoconsumo, como Olmeca de Guatemala, con una planta productiva auto sostenible, localizada en el departamento de San Marcos, que produce biodiesel a partir de aceites reciclados.

Los aceites que constituyen materias primas posibles para producción de biodiesel en Guatemala son: la palma africana, *Jatropha curcas* (piñón) y *Ricinus communis* (higüerillo). El impulso a la producción de biodiesel está ligado al desarrollo rural, teniendo el potencial para reintegrar a la vida económica del país a comunidades productoras, a través de la apertura de nuevos mercados para productos agrícolas.

Es de carácter urgente e interés nacional fomentar el desarrollo de tecnologías más limpias, avanzadas, eficientes, económicamente accesibles y efectivas. El cambio climático constituye una amenaza mundial. En caso de no tomarse medidas de mitigación, la concentración de gases de invernadero podría triplicarse para finales del presente siglo, provocando con un riesgo mínimo del 50% un incremento de 5 grados Celsius en la temperatura global, con consecuencias graves tales como la reducción en cosechas, elevación del nivel de mar, sequías, inundaciones, aumento en la intensidad de tormentas, incendios forestales y acidificación de océanos entre otros (Stern, 2007).

La presente investigación contribuye a contrarrestar la problemática descrita, brindando documentación de apoyo que contribuya a eliminar una

de las barreras incipientes para el desarrollo energético sustentable de Guatemala, como es la falta de información por parte de los usuarios, y que constituya una herramienta para la promoción de un desarrollo energético sostenible, a través de la utilización de combustibles renovables en los sistemas de transporte de Guatemala. «Si toda la caña se convirtiera en etanol, Guatemala podría reemplazar el 100% de la gasolina para los vehículos» (Asociación de Combustibles Renovables Guatemala, 2008).

Se pretende determinar las mezclas óptimas de etanol anhidro en gasolina y biodiesel en aceite combustible diesel, para su aplicación en el sistema de transporte nacional, en base a los parámetros fisicoquímicos de calidad establecidos por el ente rector en materia de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas.

Las decisiones que tome Guatemala en materia de política energética juegan un rol decisivo en el fomento del desarrollo energético sostenible y sustentable del país, la diversificación de la matriz energética y la reactivación y diversificación de la agroindustria nacional.

El trabajo final de investigación estará dividido en siete capítulos, como sigue:

El primer capítulo (I) del trabajo final comprenderá una descripción del marco legal para la comercialización de combustibles en Guatemala.

En el segundo capítulo (II) se evaluará la situación de los biocombustibles en otros países de Latinoamérica que abarque las mezclas que se están utilizando, el marco legal para la comercialización y proyectos de investigación en el campo de biocombustibles para el sector de transporte.

El tercer capítulo (III) comprenderá una descripción de los parámetros fisicoquímicos de los combustibles y sobre cómo inciden estos sobre el desempeño del combustible en el motor, así como una breve explicación de los métodos mediante los cuales se evalúan dichas propiedades.

El cuarto capítulo (IV) comprenderá toda la parte experimental de la investigación, la preparación y evaluación de las diferentes mezclas de biocombustible en combustible derivado de petróleo.

En el quinto capítulo (V) se describirán los resultados obtenidos mediante tablas y gráficas.

En el sexto capítulo (VI) se hará la interpretación de resultados y aplicación de métodos estadísticos.

En el séptimo capítulo (VII) se presentarán las conclusiones finales del presente trabajo de investigación.

2. ANTECEDENTES

Dentro del campo de los biocombustibles, la Universidad de San Carlos de Guatemala cuenta con diversos trabajos de investigación, como el realizado por Cordero López, 2003, en el cual se establecen las propiedades fisicoquímicas, a excepción de la viscosidad, del biodiesel obtenido de aceite de palma y etanol, cumplen con las especificaciones para aceite combustible diesel establecidas en el Acuerdo Gubernativo 207-2001. Asimismo, ha sido objeto de investigación el potencial que tiene Guatemala para producir biodiesel (Amézquita Maldonado, 2005), trabajo a partir del cual se determinó que Guatemala dispone del recurso biomásico suficiente para sustituir al 100% la demanda de diesel fósil por biodiesel, siendo el cultivo y fruto oleaginoso de la Palma Africana la fuente de mayor potencial para la producción de biodiesel.

En el 2008, Flores Barrios propone realizar un estudio comparativo de las propiedades fisicoquímicas de diferentes mezclas de biodiesel con diesel, tras la obtención de biodiesel de aceite de palma y aceite usado, para uso en motores de combustión interna.

Guatemala ya fue objeto de estudio de la implementación del etanol en los años ochenta (MEM, 2007) por lo que se promulgó la Ley del Alcohol Carburante, Decreto Número 17-85 y se instaló una destilería para realizar un plan piloto para el uso de gasohol, sin embargo, diversos factores como: dificultades operacionales, caída de los precios del petróleo y la falta de una adecuada planificación propiciaron la discontinuación de esta iniciativa. En cuanto a la implementación del uso de biodiesel, hasta el momento no existe

marco legal que regule la cadena de comercialización del biodiesel (MEM, 2007).

3. ALCANCES DEL TEMA

A través del presente trabajo de investigación se pretende determinar las mezclas óptimas de biocombustible en combustible derivado de petróleo para su aplicación en el sector de transporte en el país. La mezcla óptima de etanol carburante en gasolina, así como de biodiesel en diesel, será la que tenga una mayor proporción de biocombustible, que satisfaga las especificaciones de calidad establecidas por el Ministerio de Energía y Minas. La determinación de la mezcla óptima se basa únicamente en las propiedades fisicoquímicas de las mismas; la evaluación de las propiedades mecánicas de dichas mezclas en motores de combustión interna queda fuera del alcance del trabajo de investigación.

Las mezclas óptimas a determinar en esta investigación se pueden aplicar en todo el país, dado que es éste el alcance de las especificaciones de calidad establecidas por el Ministerio de Energía y Minas. La variabilidad climática entre las distintas regiones de Guatemala no constituye un impedimento para la aplicación de las mezclas en motores de combustión interna.

Las mezclas de etanol anhidro en gasolina se prepararán con alcohol carburante obtenido a partir de melaza de caña de azúcar, dado el potencial de la agroindustria azucarera local, y por ser un sustrato a partir del cual no se origina competencia por las tierras para el cultivo de alimentos, siendo la melaza un subproducto de la producción de azúcar.

Las mezclas de biodiesel en diesel de petróleo se prepararán con biodiesel obtenido de aceite de piñón, dadas las ventajas de los suelos guatemaltecos para el cultivo de la oleaginosa, la versatilidad del cultivo y precio, a diferencia del aceite de palma africana cuyo buen precio en el mercado no lo hace viable para la conversión a biodiesel.

Este trabajo de investigación pretende constituir una herramienta de apoyo para la creación de un marco legal que regule la cadena de comercialización del biodiesel y del etanol carburante, para poder implementar el uso de combustibles renovables dentro del sector de transporte en el país, contribuyendo así a diversificar la matriz energética del mismo, traduciéndose en beneficios ambientales para el país.

4. JUSTIFICACIÓN

Es de carácter urgente e interés nacional fomentar el desarrollo de tecnologías más limpias, avanzadas, eficientes, económicamente accesibles y efectivas. La Política Energética 2008-2015 (MEM, 2007) señala en su numeral 2 que se debe «diversificar la matriz energética del país priorizando las energías renovables».

La producción de biocombustibles como el etanol y el biodiesel tiene el potencial para reemplazar cantidades significativas de combustibles fósiles altamente contaminantes. En adición, ofrece una alternativa para reducir la presión económica que impone la importación de los derivados del petróleo (Red de Usuarios de Biomasa BUN-CA 2002:3).

Guatemala posee ventajas para el desarrollo de biocombustibles dados sus suelos idóneos para el cultivo de oleaginosas como la palma africana, el piñón y producción agrícola de caña de azúcar, a partir de los cuales pueden obtenerse mediante procesos relativamente sencillos y económicos, biocombustibles como el biodiesel y el etanol.

La industria de producción de alcohol cuenta con el potencial necesario para abastecer un mínimo el 10% de alcohol en las gasolinas. En adición, la industria azucarera que lo produce tiene la mejor productividad de la región (MEM 2007).

La biomasa constituye un recurso local que no está sujeto a las fluctuaciones de precios de la energía provocadas por las variaciones en el mercado internacional de combustibles derivados del petróleo. Asimismo, es un recurso sostenible que no agrega dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera y contiene cantidades insignificantes de sulfuro (SO₂), contribuyendo así a mitigar el problema mundial que constituye el cambio climático (Red de Usuarios de Biomasa BUN-CA 2002: 26).

El uso extensivo de etanol en Brasil ha demostrado, durante más de 20 años, que los biocombustibles son técnicamente factibles a gran escala. En los Estados Unidos y Europa su producción está incrementándose y se están comercializando mezclados con derivados del petróleo (Red de Usuarios de Biomasa BUN-CA 2002:26).

Las decisiones que tome Guatemala en materia de política energética juegan un rol decisivo en el fomento del desarrollo energético sostenible y sustentable del país. Dado el enorme potencial de nuestro país en recursos de biomasa para el desarrollo de proyectos de energía renovable, es evidente la necesidad de realizar trabajos de investigación que impulsen la introducción de los biocombustibles, para la promoción de un sistema de transporte sustentable como una medida de mitigación ante la eminente amenaza mundial que constituye el cambio climático, así como la reducción de la dependencia de un recurso no renovable y altamente contaminante como el petróleo.

La realización del trabajo de investigación permitiría proveer documentación de apoyo que contribuya a eliminar una de las barreras incipientes para el desarrollo energético sustentable de Guatemala, como es la falta de información por parte de los usuarios, y que constituya una

herramienta para la promoción de un desarrollo energético sostenible, a través de la utilización de combustibles renovables en los sistemas de transporte de Guatemala.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático constituye una amenaza mundial que requiere la adopción de medidas firmes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los países en desarrollo serían los primeros afectados por estar en desventaja geográfica, en áreas más cálidas y con mayor variabilidad en la pluviosidad, así como también por depender de la agricultura, que es el sector afectado con mayor intensidad por el cambio climático (Stern, 2007:36). Esto conllevaría a un retraso en el desarrollo económico y social de los países en desarrollo, entre ellos Guatemala.

En Guatemala, el sector de transporte representa el 24,9 % del consumo de energéticos (*MEM, 2010*). Del consumo final de energéticos, el diesel y la gasolina representan el 14,6 % y el 11,4 % respectivamente. Del volumen total de derivados de petróleo que se importan en Guatemala, el aceite combustible diesel es el principal producto de importación con un volumen equivalente al 36,38 % de las importaciones, seguido por la gasolina, con un volumen equivalente del 31,12 % de las importaciones (*MEM, 2010*).

Dentro de las diversas estrategias gubernamentales requeridas para mitigar las emisiones, está la promoción de sistemas de transporte más sustentable y controles de emisiones, que a su vez representa un paliativo para contrarrestar la vulnerabilidad de la economía guatemalteca al depender del precio internacional del petróleo. Guatemala posee ventajas para el desarrollo de biocombustibles dados sus suelos idóneos para el cultivo de oleaginosas para la producción de biodiesel y dado que cuenta con la

industria azucarera con mayor productividad en la región, que produce etanol a partir de melaza de caña, por lo que no constituye un riesgo para la seguridad alimentaria local.

¿Es posible impulsar en Guatemala la implementación de los biocombustibles en el sector de transporte?, ¿pueden determinarse las mezclas óptimas para la aplicación de los biocombustibles mediante la caracterización fisicoquímica de las mezclas de biocombustible en combustible derivado de petróleo?, ¿es posible proporcionar documentación determinante para la implementación de una estrategia gubernamental, y eliminar la barrera que constituye la falta de interés por parte de los usuarios?

En Guatemala no existen la reglamentación ni las especificaciones para la utilización de los biocombustibles. Desde el 2006 existe en el Congreso un estudio de Reforma de Ley del Decreto 17-85, no obstante hasta la fecha de esta investigación, esta ley es inoperante. En adición se carece de los estudios necesarios para facilitar la toma de decisiones involucradas en la definición de un Programa Nacional para la Producción y uso de Biocombustibles.

Como una de las múltiples herramientas requeridas para contrarrestar esta problemática, se pretende elaborar y evaluar mezclas con diferentes cantidades porcentuales de biocombustible en combustible fósil, para establecer las mezclas óptimas de etanol en gasolina y biodiesel en diesel de petróleo, para su uso en el transporte en Guatemala. Esto se determinará en base a las características fisicoquímicas de calidad y el cumplimiento de las especificaciones de ley establecidas por el MEM en la Nómina de Productos Petroleros, Acuerdo Ministerial 363-2009. El trabajo presente tiene como

finalidad promover la investigación y desarrollo de la utilización de biocombustibles; constituir una herramienta para la promoción del uso de combustibles renovables en los sistemas de transporte en Guatemala, que a su vez promoverá el desarrollo energético sostenible, la diversificación de la matriz energética y la reactivación y diversificación de la agroindustria nacional.

6. MARCO TEÓRICO

Las tecnologías de energía renovable pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases de invernadero de los sistemas convencionales que utilizan combustibles fósiles, como el carbón, y productos derivados del petróleo. En economías de orientación agrícola, como las de los países centroamericanos, el uso apropiado de la biomasa ofrece una alternativa para reducir la presión económica que impone la importación de los derivados del petróleo (Red de Usuarios de Biomasa BUN-CA 2002:3).

6.1. Cambio climático

El cambio climático constituye una amenaza mundial que requiere la adopción de medidas firmes para reducir las emisiones (mitigación). En caso de no tomarse medidas internacionales, la concentración de gases de invernadero podría triplicarse para finales del siglo actual, provocando con un riesgo mínimo del 50 % que durante las décadas siguientes aumente la temperatura global en 5 grados Celsius, provocando consecuencias graves tales como: reducción en cosechas, elevación del nivel de mar, sequías, inundaciones, olas térmicas, aumento en la intensidad de tormentas, incendios forestales, acidificación de océanos, aumento mundial de muertes por estrés térmico y el comienzo de la fusión irreversible de las capas de hielo, lo cual constituiría una amenaza para tierras que son hoy en día hogar para una de cada veinte personas (Stern, 2007:36).

6.2. Combustibles renovables y biocombustibles

Los biocombustibles constituyen una fuente de energía renovable derivada de la biomasa, o materia orgánica generada en un proceso biológico. Se utilizan como combustibles en motores de combustión interna, puros o mezclados con combustibles fósiles. Los biocombustibles más desarrollados y utilizados son:

- Etanol: obtenido de la fermentación alcohólica de azúcares.
- Biodiesel: sintetizado a partir de ácidos grasos y ésteres alcalinos.
- Biogás: originado a partir de la descomposición anaeróbica de materia orgánica.

6.3. Etanol

El etanol es un recurso renovable de combustión limpia cuya adición en la gasolina destilada de petróleo incrementa su octanaje. Este alcohol líquido se compone de oxígeno, hidrógeno y carbono ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) y se obtiene de la fermentación de azúcar o almidón convertido contenido en los granos y en otras materias primas agrícolas o agro-forestales. En Guatemala se produce etanol a partir de melaza de caña de azúcar desde hace décadas y se produce con fines industriales tanto para el mercado interno como para la exportación. En cuanto al consumo nacional de etanol como combustible vehicular no existe. Debido a que es producido en el país, el etanol carburante ayudaría a reducir la dependencia de Guatemala en fuentes extranjeras de energía, fortaleciendo las economías rurales, creando puestos

de trabajo y proporcionando beneficios ambientales en el país (Asociación de Combustibles Renovables Guatemala, 2011:33).

6.4. Etanol en Guatemala

Capacidad instalada de producción: a la fecha de investigación se tienen cinco (5) destilerías con una capacidad de 200 millones de litros/año, se prevé incrementar la capacidad para el 2012 a 269 millones de litros/año (Asociación de Combustibles Renovables Guatemala, 2008).

Materia prima: la materia prima en Guatemala es la melaza, un subproducto del proceso de la caña de azúcar, por lo cual la producción de etanol no compite con la producción de azúcar, pero si es dependiente de la caña de azúcar, que se cosecha anualmente en los meses de noviembre a mayo. En Guatemala NO hay conflicto con la seguridad alimentaria.

Destino del alcohol etílico: actualmente más del 80 % de su producción como alcohol etílico tradicional y carburante se exporta, principalmente a Europa y Estados Unidos. El 20 % restante se utiliza en la industria local de bebidas. No se utiliza nada para carburante (biocombustibles en Guatemala 2011:10).

6.5. Biodiesel en Guatemala

Los aceites que constituyen materias primas posibles para producción de biodiesel en Guatemala son la palma africana, *Jatropha curcas* (piñón) y *Ricinus communis* (higuerillo). En Guatemala, los departamentos que cuentan con mayor siembra de palma africana son: Izabal con el 43 %, San Marcos y El Petén cada uno cuenta con el 23 % y Escuintla tiene el 8 %. A la

fecha se reporta un total de ocho productores de biodiesel, considerados como los más importantes del país. De este total, dos productores generan el 72,5 % de la producción, con una capacidad instalada de 3 000 galones al día y los restantes seis productores aportan un 27,5 % de la producción total (MEM, 2007: 44).

La industria del biodiesel es reciente en nuestro país, la cantidad de productores y su oferta de biodiesel es pequeña y todavía no se comercializa abiertamente, únicamente se establecen contratos entre productores y flotillas vehiculares que utilizan biodiesel, no existen las condiciones legales para su uso como combustible automotor y su comercialización no está regulada al día de hoy.

Capacidad instalada: 4 000 galones/día

Materias primas: aceites reciclados (según la investigación, es la mayor fuente de materia prima), grasas y *Jatropha curcas* (piñón).

Nota: la palma africana no es utilizada para producir biodiesel ya que está afectada directamente por los precios internacionales, y su precio de venta como producto comestible es mucho más rentable que como producto combustible (Asociación de Combustibles Renovables Guatemala, 2008:11).

El impulso a la producción de biodiesel puede reintegrar numerosas comunidades productoras a la vida económica del país, a través de la apertura de nuevos mercados para productos agrícolas. El biodiesel tiene la posibilidad de estar ligado al desarrollo rural.

6.6. Propiedades fisicoquímicas de la gasolina

Los parámetros fisicoquímicos establecidos en las especificaciones de calidad para gasolinas incluyen: punto de inflamación, densidad a 15 grados Celsius, temperaturas de destilación del 10, 50, y 90 %, azufre total y presión de vapor, entre otras que se describen a continuación.

6.6.1. Azufre total

El contenido excesivo de azufre puede incrementar las emisiones nocivas (SOx) y depósitos en la máquina.

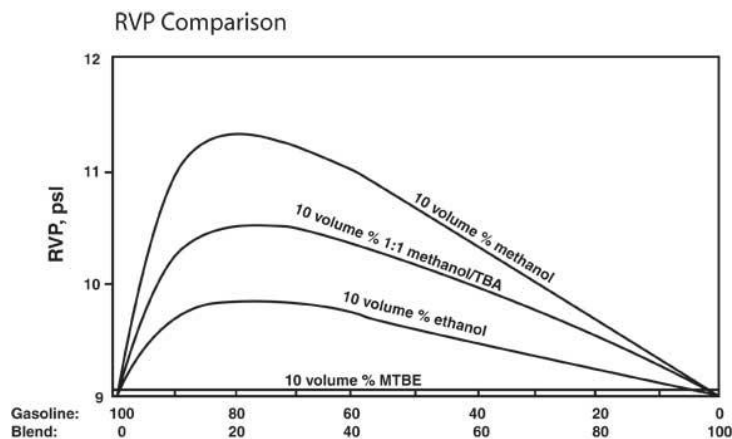
Puede generar compuestos ácidos que disminuyen la eficiencia del aceite lubricante y disminuye la vida del motor.

Principio: S₂- es expuesto a rayos X y la radiación absorbida se transforma a luz visible (ASTM D 4294).

6.6.2. Presión de vapor

Indica el contenido de productos volátiles que condicionan la seguridad en el transporte, pérdidas en el almacenamiento y volatilidad de la gasolina (ASTM D 5191).

Figura 1. Presiones de vapor comparativas (RVP) para gasolinas aditivas con diferentes oxigenantes. Metanol, metanol/alcohol t-butílico (TBA), etanol, metil t-butil éter (MTBE)



Fuente: ASTM D4814-11b. Especificación estándar para combustibles para automotores de encendido por chispa. 2011.

6.6.3. Destilación a presión atmosférica

Las características de destilación son críticas dado que afectan el arranque y calentamiento del motor, y la tendencia al bloqueo de vapor durante la combustión.

Temperatura de destilación del 10 % de la gasolina: debe ser lo suficientemente baja para asegurar el arranque del motor a temperaturas normales.

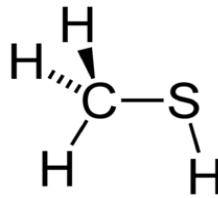
Temperatura de destilación del 50 % de la gasolina: afecta la manejabilidad y desempeño del motor en ralentí.

Temperatura de destilación del 90 % de la gasolina (y punto final de ebullición): incide sobre la formación de depósitos sólidos. (ASTM D 86)

6.6.4. Azufre mercaptano

El azufre mercaptano es un compuesto sulfurado que presenta el radical RSH, como se observa en la figura 2. Ocurre de manera natural en el petróleo. Tiene un efecto adverso sobre los elastómeros del sistema por ser altamente corrosivo. También tiene un olor objetable (ASTM D 3227).

Figura 2. Enlace químico en azufre mercaptano (tioles)



H: Hidrógeno.

C: Carbono.

S: Azufre

Fuente: ASTM D5191-10b. Determinación de presión de vapor de productos petrolíferos. 2010.

6.6.5. Prueba Doctor

Consiste en un test para determina el sulfuro enlazado en forma $-SH$ o H_2S (ácido sulfhídrico). Un resultado positivo en la prueba doctor indica que hay presencia de azufre en los combustibles que puede atacar diversos materiales metálicos y no metálicos en los sistemas de distribución de combustible (ASTM D 5191).

6.6.6. Corrosividad del cobre

Los combustibles deben pasar la prueba de corrosión a la tira de cobre para asegurar que la corrosión en los sistemas de combustible, derivada de los componentes azufrados presentes es mínima. La acción corrosiva de los compuestos azufrados remanentes varía dependiendo del tipo químico. Según el tipo y concentración de oxigenados, las mezclas gasolina – oxígeno (O₂) pueden corroer metales como: zinc (Zn), magnesio (Mg), aluminio (Al), aceros y aleaciones estaño (Sn)- Zinc (Zn) (ASTM D 130).

Figura 3. **Guía para la evaluación del grado de corrosión en la tira de cobre**



Fuente: ASTM D130-10. Evaluación de la corrosividad al cobre de productos petrolíferos. 2010.

6.6.7. Grados API

La gravedad API es la densidad del combustible. La escala API se define como una función de la gravedad específica 60/60 grados Fahrenheit (15,56/15,56 grados Celsius).

$$\text{API gravity, deg} = (141.5/\text{sp gr } 60/60^{\circ}\text{F}) - 131.5$$

Se debe conocer la gravedad API para convertir volúmenes medidos a volúmenes a 60 grados Fahrenheit (15,56 grados Celsius). Ésta se determina mediante hidrómetros que varían en escalas desde la 1 a la 8 conforme disminuye la densidad del combustible (ASTM D 287).

6.6.8. Contenido de gomas

El contenido de gomas es la porción insoluble del combustible que puede obstruir los filtros. Contribuye a la formación de depósitos sobre los carburadores, inyectores de combustible, colector de admisión y válvulas.

Principio: mide el residuo remanente tras la evaporación del combustible seguido de un lavado con n-heptano (ASTM D 381).

6.6.9. Número de octano RON

Constituye una medida de la resistencia a la explosión de combustible en el motor durante la combustión. Se determina mediante un motor calibrado con una solución patrón de isooctano (100 octanos) en una mezcla de n-heptano (0 octanos) (ASTM D 2699).

6.7. Parámetros fisicoquímicos del diésel

Dentro de los parámetros fisicoquímicos de calidad del diésel están la densidad a 15 grados Celsius, el punto de enturbiamiento, punto de congelamiento, viscosidad cinemática a 40 grados Celsius y contenido de azufre, entre otras que se describen a continuación.

6.7.1. Punto de congelamiento (*pourpoint*) y punto de enturbiamiento (*cloudpoint*)

Sirven como un indicador de las temperaturas más bajas a las cuales el combustible es funcional para un buen desempeño automotor.

Cloud Point: temperatura a la cual aparece el más pequeño y observable conglomerado de cristales. El propósito es detectar la temperatura del cambio de fase líquido-sólido (ASTM D 2500).

Pour Point: temperatura la cual se solidifica la muestra bajo análisis (ASTM D 97).

6.7.2. Punto *flash*

Es un indicador de la tendencia del combustible a formar mezclas inflamables con el aire. Es directamente proporcional a la cantidad de compuestos volátiles presentes (ASTM D 93).

6.7.3. Número de cetano

Representa el retardo en la ignición. Un mayor número de cetano implica un menor retardo en la autoignición del combustible. A mayor número de cetano, el motor arrancará bien a bajas temperaturas, no habrá golpeteo y la combustión se mantiene regular y suave (ASTM D 976).

6.7.4. Viscosidad cinemática

Es la resistencia a fluir del combustible. Es importante para estimar el almacenaje óptimo, manejo y condiciones operacionales (ASTM D 445).

7. HIPÓTESIS

1. Una mezcla de etanol derivado de melazas de caña en gasolina cumple con los parámetros fisicoquímicos de calidad vigentes, establecidos por el Ministerio de Energía y Minas en la Nómina de Productos Petroleros, Acuerdo Ministerial 363-2009.
2. Una mezcla de etanol derivado de melazas de caña en gasolina no cumple con los parámetros fisicoquímicos de calidad vigentes, establecidos por el Ministerio de Energía y Minas en la Nómina de Productos Petroleros, Acuerdo Ministerial 363-2009.
3. Una mezcla de biodiesel derivado del piñón en diesel de petróleo cumple con los parámetros fisicoquímicos de calidad vigentes, establecidos por el Ministerio de Energía y Minas en la Nómina de Productos Petroleros, Acuerdo Ministerial 363-2009.
4. Una mezcla de biodiesel derivado del piñón en diesel de petróleo no cumple con los parámetros fisicoquímicos de calidad vigentes, establecidos por el Ministerio de Energía y Minas en la Nómina de Productos Petroleros, Acuerdo Ministerial 363-2009.

Hipótesis auxiliares

Modelos múltiples: 1. Establecimiento de un modelo que describa el comportamiento de la Gravedad API a 60 grados Fahrenheit de una mezcla

de biodiesel en diesel, en función de la viscosidad cinemática a 40 grados Celsius y el punto de nube del combustible. Sea:

$$y = f(x_1, x_2)$$

$$\text{Gravedad API} = f(\text{viscosidad cinemática, punto de nube})$$

Dónde:

Gravedad API. Grados API a 60 grados Fahrenheit (15,56 grados Celsius)

Viscosidad Cinemática. 1,9 – 4,1 mm²/s a 40 grados Celsius (MEM, 2009)

Punto de Nube. 0 °C Máx. (MEM, 2009)

Hipótesis Nula Ho: la gravedad en grados API de una mezcla de biodiesel en diesel no está interrelacionada con la viscosidad del combustible y el punto de nube del combustible.

$$r = 0$$

Hipótesis Alternativa HA: la gravedad en grados API de una mezcla de biodiesel en diesel es explicada por los regresores: viscosidad del combustible a 40 grados Celsius y punto de nube del combustible.

$$r \neq 0$$

De manera semejante, se plantearán modelos múltiples para: 2. El estudio de la interrelación entre el índice de cetano del combustible (y) en función de la Gravedad API (x1) y la temperatura de destilación del 50% del combustible, en grados Celsius ° C (x2).

$$\text{Indice de Cetano} = f(\text{Gravedad API}, \text{Temperatura Destilación 50\%})$$

Variable explicada y; variable explicativa x1; variable explicativa x2

Dónde:

Índice de Cetano. Adimensional, mín. 45 (MEM, 2009)

Gravedad API. Grados API a 60 grados Fahrenheit (15,56 grados Celsius)

Temperatura de Destilación del 50 %, grados Celsius

Y para 3. El análisis de la relación existente entre la corrosividad del combustible hacia el cobre (y), la concentración de azufre en el combustible (x1) y el contenido de agua y sedimentos (x2).

$$\text{Corrosividad hacia el Cobre} = f([\text{Azufre, \%masa}], [\text{Agua y Sedimentos, \%vol}])$$

Variable dependiente y; variable independiente x1; variable independiente x2

Dónde:

Corrosividad al Cobre. Máx. 2 Según tabla referencia ASTM (MEM, 2009)

Azufre, %masa. 0,50 % masa Máx. (MEM 2009)

Agua y Sedimentos, %volumen. 0,05 % vol. Máx. (MEM 2009)

En cada escenario, la hipótesis nula plantea que no existe asociación entre las variables $r = 0$ y la hipótesis alterna plantea que si existe un grado de asocio entre las variables implicadas.

Modelo lineal

El contenido de cenizas en porcentaje de masa es explicado por el residuo de carbón en porcentaje de masa. Sea:

$$y = f(x)$$

$$\text{Contenido de Cenizas (\% masa)} = f(\text{Residuo de Carbón, \% masa})$$

0,01 % masa máx. 0,10 % masa máx. (MEM, 2009)

Hipótesis Nula H_0 : el contenido de cenizas en porcentaje de masa de una mezcla de biodiesel en diesel no está interrelacionado con el residuo de carbón en porcentaje de masa del combustible.

$$r = 0$$

Hipótesis Alterna H_A : el contenido de cenizas en porcentaje de masa de una mezcla de biodiesel en diesel es explicado por el residuo de carbón en porcentaje de masa del combustible.

$$r \neq 0$$

8. MÉTODOS Y TÉCNICAS

8.1. Procedimiento

Se obtendrán 0,55 galones de combustible gasolina regular de cada una de las cuatro principales abastecedoras del país, para preparar una muestra compuesta de 2,2 galones (8,33 L). Siguiendo el mismo procedimiento, se preparará una muestra compuesta de combustible diesel de 2,2 galones (8,33 L). Asimismo, se obtendrán 2 litros de alcohol carburante producido a partir de melazas de caña, la muestra se obtendrá de las destilerías Bioetanol y DARSA, ubicadas en los departamentos de Escuintla y Retalhuleu, respectivamente. Se prepararán 2 litros de mezcla E5 (100 mL de etanol: 1 900 mL de gasolina), E10 (200 mL de etanol: 1 800 mL de gasolina), E15 (300 mL de etanol: 1 700 mL de gasolina) y E20 (400 mL de etanol: 1 600 mL de gasolina) de etanol carburante en gasolina.

8.2. Variables e indicadores

Se evaluarán las características fisicoquímicas para la muestra compuesta de gasolina regular y para las mezclas E5, E10, E15 y E20. Las evaluaciones se harán por triplicado para minimizar el error en los resultados. Los parámetros a evaluar son:

Tabla I. Especificaciones de calidad para gasolina regular

| CARACTERÍSTICA | UNIDADES | MÉTODOS ASTM | VALORES |
|--|-------------------|--------------|------------|
| Corrosión a la Tira de Cobre, 3 h @ 50° C | ----- | ASTM D-130 | No. 1 Máx. |
| Corrosión a la Tira de Plata, 3 h @ 50° C | ----- | ASTM D-4814 | No. 1 Máx. |
| Destilación | | | |
| 10% Recuperados | ° C | ASTM D-86 | 65 Máx. |
| 50% Recuperados | ° C | | 77-121 |
| 90% Recuperados | ° C | | 190 Máx. |
| Punto Final de Ebullición | ° C | | 225 Máx. |
| Residuo | % Volumen | | 2 Máx. |
| Gravedad API a 15.56 °C (60° F) | Grados API | ASTM D-287 | Reportar |
| Densidad a 15° C | Kg/m ³ | ASTM D-1298 | Reportar |
| Presión de vapor Reid a 37.8 °C | Psi | ASTM D-5191 | 10 Máx. |
| Número de Octano RON | ----- | ASTM D-2699 | 88 Mín.*** |
| Número de Octano MON | ----- | ASTM D-2700 | 78 Mín.*** |
| Oxígeno | % Volumen | ASTM D-4815 | Reportar |
| Benceno | % Volumen | ASTM D-3606 | Reportar |
| Aromáticos | % Volumen | ASTM D-1319 | Reportar |
| Olefinas | % Volumen | ASTM D-1319 | Reportar |
| Gomas Existentes (lavado con solvente) | mg/100 mL | ASTM D-381 | 4 Máx. |
| Contenido de Azufre Total | % Masa | ASTM D-4294 | 0,10Máx. |
| Estabilidad a la Oxidación. Tiempo de oxidación. | Minutos | ASTM D-525 | 240 Mín. |
| Contenido de Plomo | g Pb/L | ASTM D-3237 | 0,013 Máx. |
| Prueba Doctor | ----- | ASTM D-4952 | Negativa |

Fuente: Tabla No. 4. Especificaciones de calidad para gasolina regular. Nómina de Productos Petroleros MEM. Acuerdo Ministerial 363-2009.

Número de octano RON, valor mínimo aplica para la muestra compuesta de gasolina regular. Para las mezclas E5, E10, E15 y E20 se busca estudiar como aumenta el número de octano conforme se incrementa el porcentaje de etanol carburante agregado como aditivo.

La especificación de calidad de MON no está dada como tal en el documento original, no obstante está dado el valor mínimo para el índice de octano: $(RON+MON)/2$, que debe ser como mínimo 83,0, a partir del cual se puede calcular el valor mínimo para MON.

Se obtendrán 2 litros de biodiesel producido a partir de piñón (*Jatropha Curcas*), la muestra se obtendrá de la planta de Biocombustibles de Guatemala. Se procederá a la preparación de las muestras B5 (100 mL de

biodiesel: 1 900 mL de diesel), B10 (200 mL de biodiesel: 1 800 mL de diesel), B15 (300 mL de biodiesel: 1 700 mL de diesel) y B20 (400 mL de biodiesel: 1600 mL de diesel) de biodiesel en diesel derivado de petróleo.

Se evaluarán las características fisicoquímicas para la muestra compuesta de diesel y para las mezclas B5, B10, B15 y B20. Las evaluaciones se harán por triplicado para obtener valores más precisos. Los parámetros a evaluar son:

Tabla II. **Especificaciones de calidad para aceite combustible diésel 2-D**

| CARACTERÍSTICA | UNIDADES | MÉTODOS ASTM | VALORES |
|---|--------------------|--------------|-------------------|
| Gravedad API a 15.56 °C (60° F) | Grados API | ASTM D-287 | Reportar |
| Densidad a 15° C | Kg/m ³ | ASTM D-1298 | Reportar |
| Destilación | | | |
| 10% Recuperados | ° C | ASTM D-86 | Reportar |
| 50% Recuperados | ° C | | Reportar |
| 90% Recuperados | ° C | | 360 Máx. |
| Punto Final de Ebullición | ° C | | Reportar |
| Índice de Cetano Calculado | ----- | ASTM D-976 | 45 Mín. |
| Viscosidad Cinemática @ 40° C | mm ² /s | ASTM D-445 | 1.9 – 4.1 |
| Color ASTM | ----- | ASTM D-1500 | Reportar |
| Contenido de Azufre Total | % Masa | ASTM D-4294 | 0,50Máx. |
| Residuo de Carbón Conradson (10% Residuo) | % Masa | ASTM D-189 | 0,10Máx. |
| Contenido de Cenizas | % Masa | ASTM D-482 | 0,01Máx. |
| Agua y Sedimentos | % Volumen | ASTM D-2709 | 0,05Máx. |
| Corrosión a la Tira de Cobre, 3 h @ 50° C | ----- | ASTM D-130 | No. 2 Máx. |
| Punto de Inflamación | ° C | ASTM D-93 | 52 Mín. |
| Aromáticos | % Volumen | ASTM D-1319 | Reportar |
| Punto de Enturbiamiento | ° C | ASTM D-2500 | 0 Máx. |
| Punto de Congelación | ° C | ASTM D-97 | Reportar |
| Apariencia | ----- | ASTM D-4176 | Claro y Brillante |

Fuente: Tabla No. 9. Especificaciones de Calidad para Aceite Combustible Diesel. Nómina de Productos Petroleros MEM. Acuerdo Ministerial 363-2009.

Las mezclas óptimas se establecerán con base en el cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos para los combustibles gasolina regular y diesel en la nómina de productos petroleros emitida por el Ministerio de Energía y Minas (Acuerdo Ministerial 363-2009).

Se obtendrán los promedios de cada corrida con su respectiva desviación estándar para analizar el arrastre de error.

Se realizarán diagramas de dispersión para la evaluación del comportamiento de cada uno de los parámetros de calidad para los combustibles gasolina y diesel respectivamente, en función de la cantidad de biocombustible adicionado. Se determinarán las mezclas óptimas mediante interpolación, utilizando como referencia los valores mínimos y máximos permisibles según la nómina de productos petroleros.

En el análisis estadístico de los datos experimentales obtenidos se utilizará un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor. El enfoque del análisis de varianza permite hacer una partición de la suma total de cuadrados en una parte que se deba a la regresión, y en otra que se deba al error. En este trabajo, por cada característica de calidad se tomarán 3 muestras (n) y se evaluarán todos los parámetros fisicoquímicos para cada una de las 5 poblaciones (k) de cada uno de los dos biocombustibles evaluados, es decir, mezclas biodiesel/diesel y etanol carburante/gasolina.

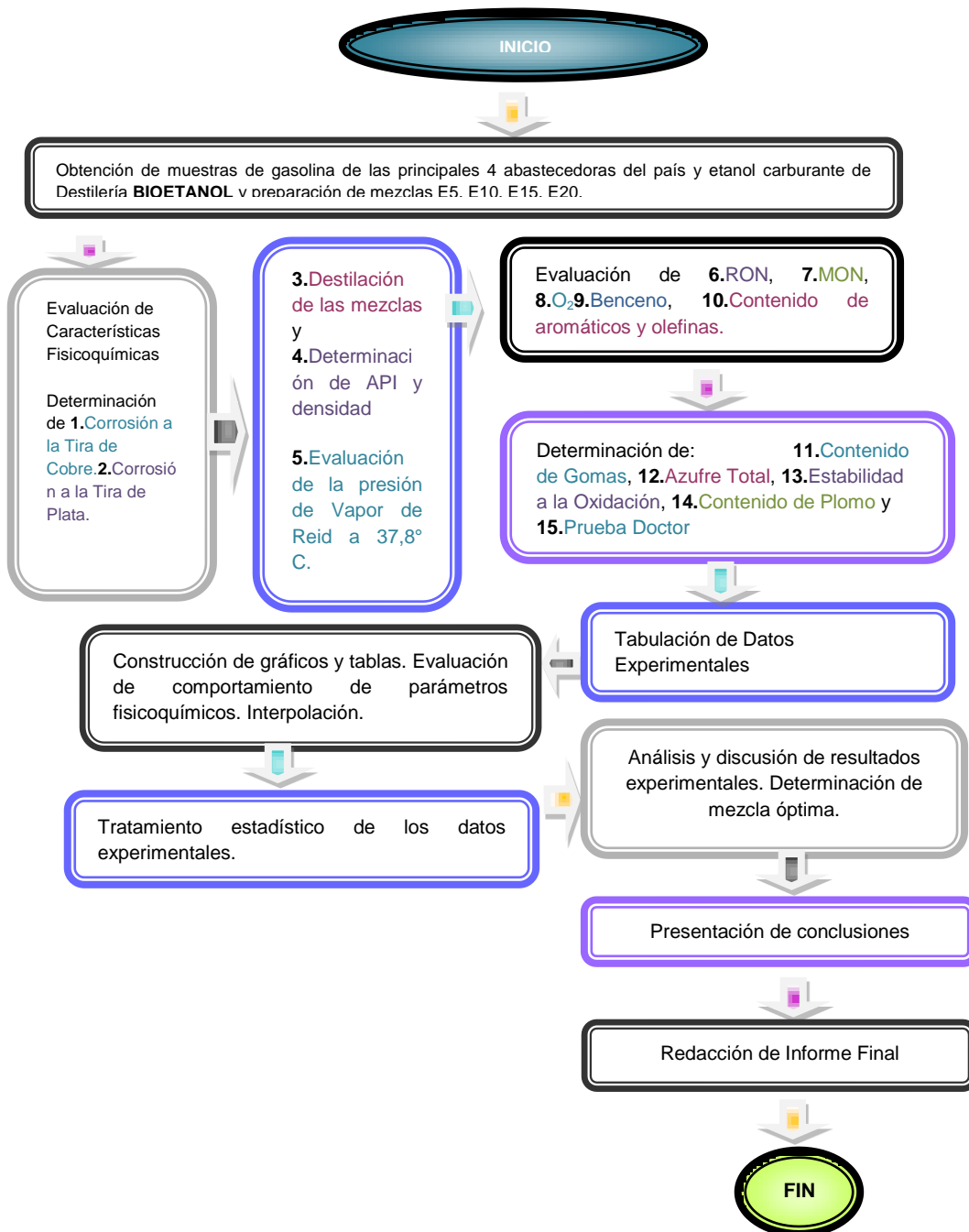
En este trabajo de investigación se plantearán matrices de $n \times k$ para cada una de las características fisicoquímicas que muestren un comportamiento divergente en función del incremento del porcentaje del biocombustible contenido en la mezcla (15 características fisicoquímicas para mezclas de biodiesel en diesel y 16 características fisicoquímicas para

mezclas de etanol en gasolina). Finalmente se aplicará una prueba de Tukey con una confiabilidad del 95 % para establecer las comparaciones de las medias poblacionales y concluir cuál es la mejor mezcla de biocombustible/combustible derivado de petróleo, en función del cumplimiento de las especificaciones de calidad establecidas por el MEM. La mejor mezcla será la que contenga la máxima cantidad de biocombustible en el combustible fósil cumpliendo con todas las especificaciones de calidad.

8.3. Metodología experimental

A continuación se describen las secuencias de pasos a seguir para la evaluación de las mezclas de etanol carburante en gasolina y biodiesel en aceite combustible diesel, respectivamente.

Figura 4. Diagrama de flujo de trabajo, evaluación de muestras gasolina-etanol carburante



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Diagrama de flujo de evaluación de muestras de diésel-biodiesel



Fuente: elaboración propia.

8.4. Resultados esperados

Comportamiento de la Gravedad API a 60 grados Fahrenheit de una mezcla de biodiesel en diesel, en función de la viscosidad cinemática a 40 grados Celsius y el punto de nube del combustible. Sea:

$$y = f(x_1, x_2)$$

$$\text{GravedadAPI} = f(\text{viscosidadcinemática}, \text{puntodenube})$$

Grados API a 60 grados Fahrenheit 1,9 – 4,1 mm²/s a 40 grados Celsius 0 grados Celsius Máx.

Se espera una relación directamente proporcional entre la viscosidad cinemática y la gravedad del combustible. Dado que la Gravedad API es una función lineal inversa de la densidad del combustible, entre menor sea el API, mayor es la densidad del combustible.

$$\text{APIGravity, deg} = \left(\frac{141,5}{\text{GravedadEspecifica } 60/60^\circ F} \right) - 131,5$$

La densidad de una molécula es una función lineal de la masa molecular y lineal inversa del volumen (densidad = masa/volumen) y a mayor masa molecular, mayor es la resistencia a fluir, se incrementa la viscosidad.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{API} & \propto & (\text{Viscosidad})^{-1} & \propto & (\text{Punto de Nube})^{-1} \\ y & & x_1 & & x_2 \end{array}$$

Se espera una relación inversamente proporcional entre el API y el punto de nube; entre más bajo es el API, mayor es la densidad del combustible y por ende su composición química es más pesada (longitudes largas de cadena de carbono-hidrógeno). Este comportamiento se observa en los combustibles destilados de petróleo, donde: $API_{BÚNKER} < API_{DIESEL} < API_{GASOLINA}$. En las moléculas orgánicas, conforme se incrementa el peso molecular (longitud de cadena), se incrementa la temperatura del punto de congelación de la molécula respectiva. El punto de nube es la temperatura a la cual el aceite combustible diesel inicia un proceso de cristalización.

Este parámetro es de suma importancia en el desempeño de vehículos de motor diesel en regiones de clima frío, donde el punto de nube del combustible debe ser lo suficientemente bajo para no permitir que las bajas temperaturas de la región, induzcan el proceso de cristalización, provocando problemas en la operación del vehículo. El mejor modelo se definirá a partir de un diagrama de dispersión de los datos obtenidos. Se propone un modelo lineal: $y = a + b_1/x_1 - b_2/x_2 + \epsilon$.

Estudio de la interrelación entre el índice de cetano del combustible (y) y la Gravedad API (x_1) y la temperatura de destilación del 50% del combustible en grados Celsius ($^{\circ}C$) (x_2).

$$Indice\ de\ Cetano = f(Gravedad\ API, Temperatura\ Destilación\ 50\%)$$

Con esta investigación se pretende establecer el grado de asociación entre dichos parámetros, dado que se sabe que los 3 parámetros: y , x_1 , x_2 están relacionados con la composición química del combustible, recordando que el diesel no es un compuesto puro sino una mezcla de hidrocarburos de

longitudes de cadena entre C15 y C18; la fracción de componentes petrolíferos que hierven en un intervalo de temperaturas de 200-350 grados Celsius (392-662 grados Fahrenheit).

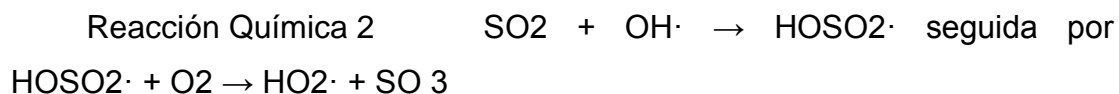
Análisis de la relación existente entre la corrosividad del combustible hacia el cobre (y), la concentración de azufre en el combustible (x1) y el contenido de agua y sedimentos (x2).

$$\text{Corrosividad hacia el Cobre} = f([\text{Azufre, \%masa}], [\text{Agua y Sedimentos, \%vol}])$$

Se espera tener una relación directamente proporcional entre las 3 variables implicadas, sea:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Corrosividad} & \propto & [\text{azufre, \%masa}] & \propto & [\text{Agua y Sedimento, \%vol}] \\ y & & x1 & & x2 \end{array}$$

Dado que el azufre es un agente altamente corrosivo. En combinación con el oxígeno durante el proceso de combustión, conduce a la formación SOx, que pueden provocar corrosión en los sistemas de combustible. En adición, tienen un efecto adverso sobre los elastómeros del sistema. Si hay presencia de agua en el sistema, esta se combina con el óxido de azufre para formar ácido sulfúrico (corrosión), según las reacciones:



Se propone un modelo lineal:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \varepsilon.$$

El mejor modelo se definirá a partir de un diagrama de dispersión de los datos obtenidos.

Conocer el comportamiento de los puntos de inflamación de mezclas a diferentes proporciones de biodiesel en diesel, y estimar la probabilidad de que el valor de dicho parámetro exceda el valor máximo permisible por la legislación guatemalteca.

Se espera que la probabilidad de excedencia $P(x < 52)$, es decir, la probabilidad de que el punto de inflamación (flash point) sea menor al valor mínimo permisible (52 grados Celsius) sea baja, asumiendo que los combustibles comercializados en Guatemala no están en el límite de aceptación dicha característica y que el biodiesel de aceite de palma no provocará un descenso considerable (la mezcla máxima es B30) en el punto de inflamación del combustible.

Modelar la relación existente entre el contenido de cenizas del combustible biodiesel en diesel y el residuo de carbón.

Entre el contenido de cenizas del combustible, y el residuo de carbón del mismo, se espera una relación directamente proporcional, dado que el residuo carbonoso sirve como una aproximación gruesa de la tendencia del combustible a formar depósitos en la cámara de combustión. Cubre la determinación de la cantidad de residuo carbonoso tras la evaporación y pirolisis de un aceite, para productos petrolíferos relativamente no volátiles.

| | | |
|-----------------------------|----------|-------------------|
| Contenido de Cenizas, %masa | α | Residuo de Carbón |
| y | x | |

Se propone un modelo lineal: $y = a + bx + \varepsilon$. El mejor modelo se definirá a partir de un diagrama de dispersión de los datos obtenidos.

9. RECURSOS NECESARIOS

9.1. Laboratorio de ensayo

La parte experimental del trabajo de investigación se llevará a cabo en las instalaciones de IntertekOil, Chemical&Agri. Intertek es una empresa de carácter mundial dedicada a los servicios de laboratorio e inspección. Intertek América Central sirve los puntos de producción y distribución de hidrocarburos, combustibles, cargamento bruto agrícola, y logísticos en el Canal de Panamá, puertos, terminales, instalaciones de búnker, refinerías, oleoductos, y otros servicios.

Las instalaciones de Intertek se encuentran en el Puerto de San José, Escuintla, Guatemala. El laboratorio de hidrocarburos dispone de todos los equipos e infraestructura requeridos para la evaluación de las características fisicoquímicas que exige la legislación guatemalteca para los combustibles derivados de petróleo, en el Acuerdo Ministerial 363-2009: Nómina de Productos Petroleros con sus respectivas denominaciones, características y especificaciones de calidad.

9.2. Recursos materiales

Aceite combustible diesel, derivado de petróleo. Preparación de una muestra compuesta de diesel a partir de muestras obtenidas de las tres principales abastecedoras de combustibles en el país.

Gasolina regular. Preparación de una muestra compuesta de gasolina regular a partir de muestras obtenidas de las cuatro principales abastecedoras de combustibles en el país.

Etanol carburante. Obtención de alcohol deshidratado producido por bioetanol, destilería perteneciente a Ingenio Pantaleón de Guatemala, ubicada en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

Biodiesel derivado de aceite de palma. Obtención de biodiesel derivado de aceite de palma producido por Grupo Olmeca de Guatemala, ubicada en el municipio de Tecún Umán, San Marcos.

Sílica Gel, pH 5,5-7,0

Indicador Fluorescente (reactivo FIA)

Alcohol Isopropílico (2-propanol) Mín. 99,0 % pureza

Isooctano, pureza mínima del 99,75 % vol., 0,10 % vol máx. n-heptano y 0,5 mg/L máx. Plomo (Pb).

N-heptano, pureza mínima del 99,75 % vol., 0,10 % vol máx. isooctano y 0,5 mg/L máx. Plomo (Pb).

Mezcla PRF de 80 octanos: utilizando isooctano y n-heptano ambos grado combustible de referencia, debe contener $80 \pm 0,1$ % de isooctano.

9.3. Equipo

Equipo de destilación para determinación de temperaturas de destilación del 10 %, 50 % y 90 % de combustibles diesel y gasolina.

Baño de temperatura constante con agitación mecánica y aceite mineral, para determinación de viscosidad y evaluación de la corrosión a la tira de cobre y la tira de plata.

Equipo de fluorescencia de rayos X para la determinación de azufre en gasolinas y diesel.

Equipo de espectroscopía infrarroja para la determinación de MON, RON, benceno y oxígeno (O₂).

Equipo de evaporación para evaluación del contenido de gomas existentes.

Equipo para la determinación de la presión de vapor de Reid en gasolinas.

Equipo para la evaluación de la estabilidad a la oxidación en gasolinas.

Motor estandarizado ASTM de un cilindro para la determinación de RON.

Centrifugadora para determinación del contenido de agua y sedimento en diesel.

Baños de enfriamiento para la evaluación del punto de enturbiamiento y punto de escurrimiento.

Termómetro ASTM 5C (-38°C - 50°C) para medición de puntos de enturbiamiento y punto de escurrimiento.

Termómetro ASTM 12 C (-20°C – 102°C) para evaluación de API de gasolinas y diesel.

Equipo para determinación de color del diesel ASTM D 1500.

Mechero Bunsen para pruebas de residuo de carbón y contenido de cenizas.

Equipo para evaluación del punto de inflamación del diesel.

Equipo de absorción atómica para la determinación del contenido de plomo.

Lámparas ultravioleta, con radiación predominante a 365 nm.

9.4. Cristalería

Probetas para medición de API.

Hidrómetros ASTM 4H, 6H y 7H para medición de API en diesel, gasolina premium y gasolina regular, respectivamente.

Columnas de adsorción, de vidrio, consistente de tres secciones: el cargador, provisto de un cuello capilar, y las secciones de separación y de análisis.

Set de buretas calibradas, con capacidad de 200-500 mL y una tolerancia volumétrica máxima del 0,2 % para la preparación de las soluciones de calibración.

Tubos de centrifugación para evaluación de agua y sedimento

Crisoles de porcelana para la determinación de residuo de carbón y contenido de cenizas.

Probetas de 2 000 mL para la preparación de las muestras compuestas.

Viscosímetros tamaño 100 para evaluación de viscosidad de diesel.

Tubos de vidrio pyrex para evaluación de punto de congelación y punto de enturbiamiento del diesel.

9.5. Recursos humanos

Soporte: Ing. Román Chu Muñoz. Gerente IntertekOil, Chemical&Agri Guatemala y El Salvador. 7 años de experiencia en el campo de hidrocarburos.

Ing. Marco Antonio Ávila. Gerente Terminales Chevron y Unopetrol, Guatemala. 20 años de experiencia en el campo de hidrocarburos.

Asesor de Proyecto de Investigación: Ing. Byron López Maldonado.
Maestro en Energía y Ambiente. Ingeniero Químico.

Coasesor de Proyecto de Investigación: Ing. Jorge Juárez González.
Maestro en Gerencia de la Agricultura Sostenible y los Recursos Naturales.

9.6. Cuantificación de costos

Los análisis fisicoquímicos a realizar en el presente trabajo de investigación, dependen principalmente de equipos, por lo cual los costos están determinados por las evaluaciones que consumen reactivos químicos.

9.6.1. Evaluación de parámetros fisicoquímicos mezclas diesel/biodiesel

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos a evaluar para las mezclas de diesel de petróleo y biodiesel (ver tabla II, página 19) a excepción de la determinación del contenido de hidrocarburos aromáticos, se requiere únicamente equipo de laboratorio, es decir, su evaluación no consume ningún reactivo químico.

Equipos asociados: Gravedad API (probeta 700 mL, hidrómetro), densidad @ 15° C (cálculo mediante tablas), destilación (destilador manual), índice de cetano calculado (cálculo a partir de la gravedad API y temperaturas de destilación del 10, 50 y 90 % del combustible), viscosidad cinemática a 40° C (baño con aceite mineral, viscosímetros), color ASTM (colorímetro), contenido de azufre total (equipo de fluorescencia de rayos X), residuo de carbón y cenizas (mufla), punto de enturbiamiento y

congelamiento (equipo de enfriamiento, rango -50° C), corrosión al cobre (baño con aceite mineral).

Cálculo del costo de evaluación de hidrocarburos aromáticos

Reactivo a utilizar: sílica gel Cantidad: 5 g por ensayo

Costo: USD 739,98, Q 5 919,84

Embalaje: 2,5 kg (Cotización adjunta en sección de anexos)

Evaluaciones a realizar: 4 pruebas por triplicado cada ensayo = $4 \times 3 = 12$ pruebas

$$0,005 \text{ g Sílica por análisis} \times \frac{\text{Q } 5\,919,84}{2,5 \text{ kg sílica}} \times 12 \text{ evaluaciones} = \text{Q } 142,08$$

9.6.2. Evaluación parámetros fisicoquímicos mezclas gasolina/etanol carburante

Para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de las mezclas de gasolina y alcohol carburante, se incurre también en la evaluación de hidrocarburos aromáticos/olefinas, no obstante, el principal costo lo representa la medición de los octanajes, para lo cual se utiliza un motor estándar que debe ser calibrado con combustibles de referencia.

Tabla III. **Cálculo del costo de evaluación de número de octano RON**

| | |
|-----------------------------------|--|
| PRF Isooctano (1) | Cantidad: 200 mL por ensayo |
| Costo: USD 2 153,44, Q. 17 227,52 | Embalaje: 54 gal (Cotización adjunta en sección de anexos) |
| PRF n-Heptano (2) | Cantidad: 200 mL por ensayo |
| Costo: USD 2 275,40, Q. 18 203,20 | Embalaje: 54 gal (Cotización adjunta en sección de anexos) |

Fuente: elaboración propia.

Evaluaciones a realizar: 4 pruebas por triplicado cada ensayo = 4 x 3 = 12 pruebas

$$.2 \text{ L Isooctano por análisis} \times \frac{\text{Q } 17\,227,52}{54 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3,7854 \text{ L}} \times 12$$

Evaluaciones = Q 202,26

$$0.2 \text{ L n-Heptano por análisis} \times \frac{\text{Q } 18\,203,20}{54 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3,7854 \text{ L}} \times 12$$

Evaluaciones = Q 213,72

9.6.3. **Cálculo del costo de evaluación de hidrocarburos aromáticos y olefinas**

Reactivo a utilizar: sílica gel Cantidad: 5 g por ensayo

Costo: USD 739,98, Q 5 919,84

Embalaje: 2,5 kg

Evaluaciones a realizar: 4 pruebas por triplicado cada ensayo = 4 x 3 = 12 pruebas

0,005 g Sílica por análisis x $\frac{Q\ 5\ 919,84}{2,5\ \text{Kg Sílica}}$ x 12 evaluaciones = Q 142,08

Tabla IV. **Tabla final de costos para parámetros fisicoquímicos en mezclas**

| Evaluación | Costo |
|---|-----------------|
| Hidrocarburos Aromáticos y Olefinas (Mezclas Gasolina/Etanol Carburante) | Q 142,08 |
| Número de Octano RON (Mezclas Gasolina/Etanol Carburante) | Q 213,72 |
| Hidrocarburos Aromáticos (Mezclas Diesel/Biodiesel) | Q 142,08 |
| TOTAL | Q 700,14 |

Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Balance Energético 2010. Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Energía. 10-Octubre-2011. Guatemala. 4 p.
2. Biomass Users Network (BUN-CA) 2002. Manuales sobre Energía Renovable. BIOMASA. FOCER Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central. 1ª Edición. San José, Costa Rica. BUN-Centro América. 42 p.
3. CABELLO QUIÑONEZ, Ana María. 2006. Alternativas: “Solución para el Desarrollo Sustentable”. 1ª Edición. República Argentina. Adnuma Chile - Refinor Argentina. 45 p.
4. CORDERO LÓPEZ, Jorge Alejandro. *Evaluación de las propiedades físico-químicas del biodiesel obtenido a partir de aceite de palma y etanol, como combustible alternativo del diesel 2d*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2003. 104 p.
5. DE CANALES, Francisca; DE ALVARADO, Eva Luz; PINEDA, Elia Beatriz. *Metodología de la investigación*. D.F., México: Limusa, Grupo Noriega Editores, 2002. 327 p.

6. Especificación ASTM D86-11b. Destilación de Productos petrolíferos a presión atmosférica. 2011. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure'
7. Especificación ASTM D93-11. Método Estándar para la Determinación del Punto Flash. 2011. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester'.
8. Especificación ASTM D97-11. Método Estándar para la Determinación del Punto de Congelación en Derivados de Petróleo. 2011. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products'.
9. Especificación ASTM D130-10. Método Estándar para la Evaluación Corrosividad al Cobre en Derivados de Petróleo. 2010. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test'.
10. Especificación ASTM D287-92(2006). Método Estándar para la Evaluación de la Gravedad API en Productos Petrolíferos. 2006. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method)'.

11. Especificación ASTM D381-12. Método Estándar para la Determinación del Contenido de Gomas en Combustibles. 2012. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Gum Content in Fuels by Jet Evaporation'.
12. Especificación ASTM D445-12. Método Estándar para la Determinación de la Viscosidad Cinemática de Líquidos Opacos y Transparentes. 2012. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)'.
13. Especificación ASTM D613-10a. Método Estándar para la Evaluación del Número de Cetano en Aceite Combustible Diesel. 2010. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil'.
14. Especificación ASTM D975-11b. Especificación Estándar para Diesel Fuel Oils. 2011. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento original en inglés 'Standard Specification for Diesel Fuel Oils'.
15. Especificación ASTM D2500-11. Método Estándar para la Determinación del Punto de Enturbiamiento en Derivados de Petróleo. 2011. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products'.

16. Especificación ASTM D2699-12. Método Estándar para la Evaluación del Número de Octano RON en Combustibles de Encendido por Chispa. 2012. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel'.
17. Especificación ASTM D3227-04a (2010). Método Estándar para la Determinación de Azufre Mercaptano en Gasolina, Keroseno y Combustibles Destilados. 2010. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for (Thiol Mercaptan) Sulfur in Gasoline, Kerosine, Aviation Turbine, and Distillate Fuels (Potentiometric Method)'.
18. Especificación ASTM D4294-10. Método Estándar para la Determinación de Azufre en Petróleo y Derivados de Petróleo por Fluorescencia de Rayos X. 2010. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry'.
19. Especificación ASTM D4814-11b. Especificación Estándar para Combustibles para Automotores de Encendido por Chispa. 2011. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel'.
20. Especificación ASTM D4952-12. Método Estándar para el Análisis Cualitativo para Detección de Azufre Activo en Combustibles y Solventes (Prueba Doctor). 2012. ASTM (American Society for Testing

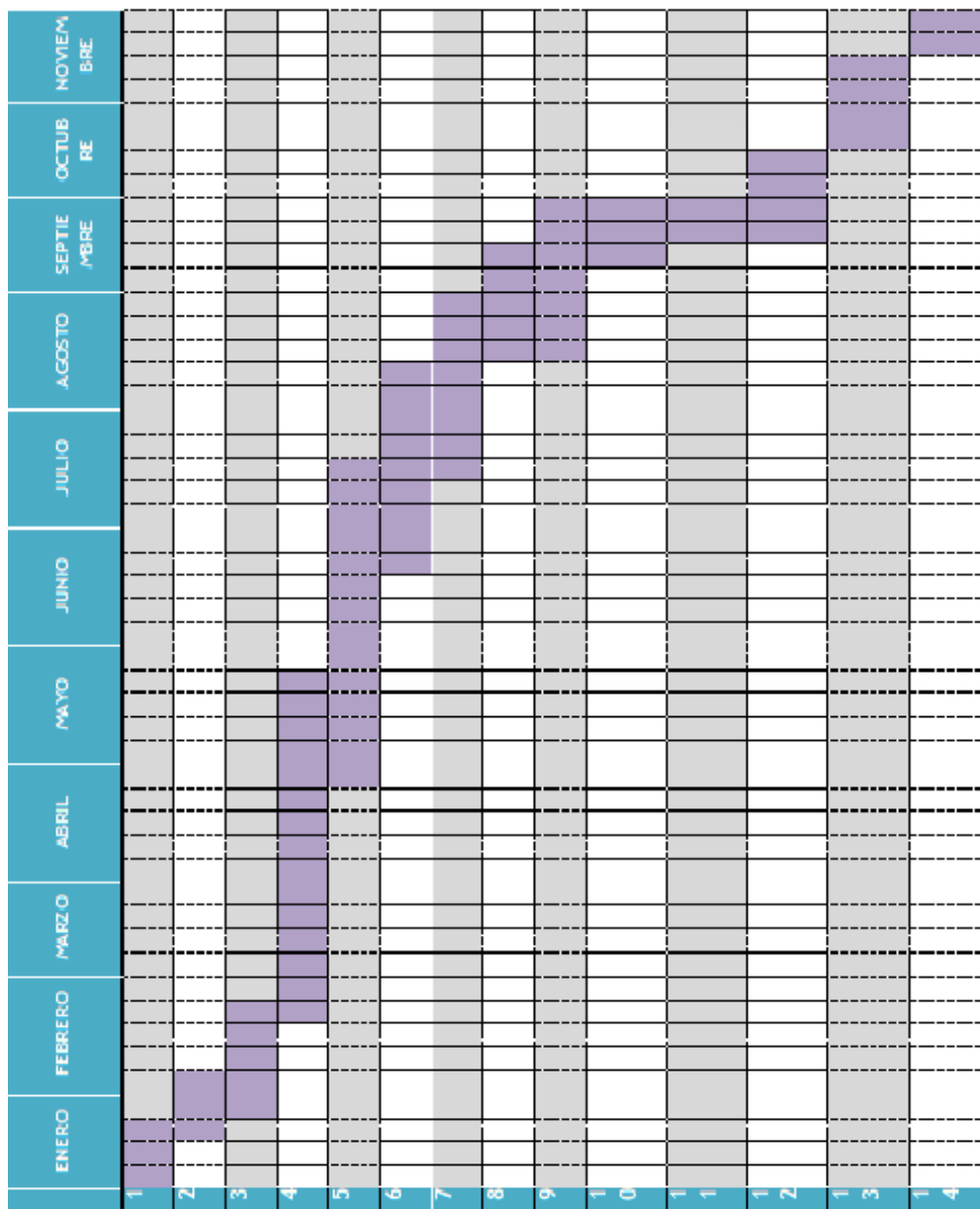
and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Qualitative Analysis for Active Sulfur Species in Fuels and Solvents (Doctor Test)'.

21. Especificación ASTM D5191-10b. Método Estándar para Determinación de Presión de Vapor de Productos Petrolíferos. 2010. ASTM (American Society for Testing and Materials). Traducido del documento escrito en inglés 'Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products (Mini Method)'.
22. FLORES BARRIOS, Leslie Mariana. *Análisis comparativo de diesel no. 2-d (automotriz) con biodiesel, elaborado a partir de aceite usado y oleína de palma africana (elaeis guineensis) en mezclas de altos porcentajes, para su evaluación en un motor estacionario de combustión interna*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008. 61 p.
23. Guatemala. 2007. Programa Nacional de Competitividad (PRONACOM). Política Energética y Minera 2008-2015. Ministerio de Energía y Minas. 100 p.
24. Guatemala. 2009. Nómima de Productos Petroleros con sus Respectives Denominaciones, Características y Especificaciones de Calidad. Acuerdo Ministerial 363-2009. Ministerio de Energía y Minas. 18 p.
25. LORENZO DE JUÁREZ, Aída. *La producción de biocombustibles y oportunidades para Guatemala*. Asociación Promotora de Combustibles Renovables. 23-Mayo-2011. Guatemala. 33 p.

26. PEDROZA, José Francisco. *Biocombustibles en Guatemala*. Noviembre 2011. Ministerio de Energía y Minas. 26 p.
27. STERN, Sir Nicolas. Stern Review on the Economics of Climate Change. *La Economía del Cambio Climático*. 2007. Foreign and Commonwealth Office. HM Treasury. Reino Unido. 36 p.
28. WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond H.; MYERS, Sharon, L.; YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 8a ed. Nahuacalpan de Juárez. México. Pearson-Prentice Hall, 2007. 816 p.

APÉNDICE

Cronograma de Actividades



Fuente: elaboración propia

Listado de actividades.

1. Obtención de Muestras de Gasolina Regular, Diesel, Biodiesel y Etanol Carburante.
2. Preparación de Muestras Compuestas y Mezclas (la Gasolina debe permanecer en refrigeración para no perder sus propiedades, en caso contrario se obtienen resultados erróneos)
3. Evaluación de Presión de Vapor y Destilación de la Muestra Compuesta de Gasolina Regular y Mezclas E5, E10, E15 y E20.
4. Caracterización Físicoquímica de Muestra Compuesta de Gasolina Regular y Mezclas E5, E10, E15 y E20.
5. Caracterización Físicoquímica de Muestra Compuesta de Diesel y Mezclas B5, B10, B15 y B20.
6. Tabulación de Datos Experimentales Obtenidos.
7. Construcción de Gráficos y Tablas.
8. Evaluación del Comportamiento de Parámetros Físicoquímicos.
9. Tratamiento Estadístico de los Datos Experimentales.

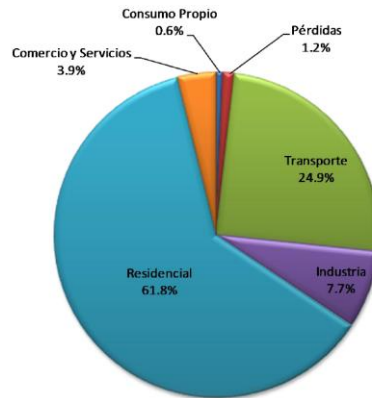
10. Análisis e Interpretación de Resultados. Determinación de Mezclas Óptimas.
11. Presentación de Conclusiones.
12. Redacción de Informe Final.
13. Revisión/Correcciones.
14. Finalización del Trabajo de Investigación.

NOTAS

Los parámetros Presión de Vapor de Reid (ASTM D 5191) y Destilación (ASTM D 86) para la Muestra Compuesta de Gasolina Regular y las Mezclas E5, E10, E15 y E20 se evaluarán con prioridad dado a que por su naturaleza, son características directamente afectadas por el manejo de la muestra y la temperatura a la cual se maneja. Las muestras deben estar a 10° C para evitar pérdidas por evaporación que conlleven a resultados erróneos.

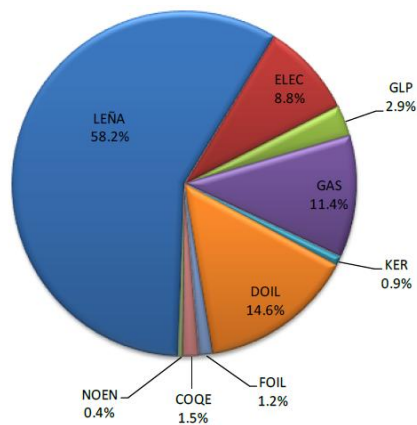
ANEXO

Consumo de Energéticos en Guatemala, 2010.



Fuente: Balance Energético 2010. Ministerio de Energía y Minas. 3 p.

Consumo Final de Energéticos en Guatemala, 2010



Fuente: Balance Energético 2010. Ministerio de Energía y Minas. 4 p.

