

**Resultado científico técnico en opción al Premio Nacional de
la Academia de Ciencias de Cuba**

***Combustibles alternativos de segunda y tercera
generación para motores de combustión
interna***

Unidad ejecutora principal

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría



cujae

La Habana, Octubre de 2017

Combustibles alternativos de segunda y tercera generación para motores de combustión interna

Unidad ejecutora principal del resultado: Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

Entidad participante: Universidad de Gante, Bélgica.

Autores Principales

- Dr. Ramón Piloto Rodríguez (Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables CETER, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cujae)
- MSc. Eliezer Ahmed Melo Espinosa (CETER, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cujae)
- Dra. Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas. (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Dr. Osney Pérez Ones (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Dr. Sebastian Verhelst (Departamento de Mecánica de la Combustión, Facultad de Ingeniería, Universidad de Gante, Bélgica)
- Dr. Leonardo Goyos Pérez (Departamento de Tecnología de Maquinarias, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cujae)
- Dr. Pedro Antonio Rodríguez Ramos (Facultad de Ingeniería Mecánica. Cujae)
- MSc. Yisel Sánchez Borroto (CETER, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cujae)
- Dra. Danay Carrillo Nieves (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- MSc. Yosvany Díaz Domínguez (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)

Colaboradores Científicos: 13

Aporte científico de los autores principales

Autor	Aporte personal	Estimado cuantitativo (%)
<p>Dr. Ramón Piloto Rodríguez Para la correspondencia: Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 e/ 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba. Tel: 266-3669 Email: rpiloto@ceter.cujae.edu.cu</p>	<p>Formulación de emulsiones que involucran residuales industriales o combustibles alternativos, estudio del impacto medio ambiental de <i>Jatropha curcas</i> como biocombustible, conversión de los residuales de la industria aceitera en combustibles alternativos. Ensayos en la cámara de combustión, modelación matemática relativa a determinar el número de cetano a partir de la composición de ácidos grasos y patente.</p>	<p>24</p>
<p>MSc. Eliezer Ahmed Melo Espinosa Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.</p>	<p>Formulación de emulsiones que involucran residuales industriales o combustibles alternativos. Desarrolla gran parte de la Ingeniería Mecánica a cargo de las pruebas en bancos de motores. Modelación matemática de la tensión superficial de aceites vegetales. Patente. Participa en las investigaciones sobre conversión de los residuales de la industria aceitera en combustibles alternativos</p>	<p>14</p>
<p>Dra. Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas Facultad de Ingeniería Química Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.</p>	<p>Estudio del impacto medio ambiental de la <i>Jatropha curcas</i> como biocombustible. Participa en el cultivo de microalga <i>Chlorella vulgaris</i>. Lidera los trabajos de obtención de etanol a partir de residuales industriales.</p>	<p>13</p>
<p>Dr. Osney Pérez Ones Facultad de Ingeniería Química Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.</p>	<p>Estudio del impacto medio ambiental de la <i>Jatropha curcas</i> como biocombustible. Participa en el cultivo de microalga <i>Chlorella vulgaris</i>. Lidera los trabajos de obtención de etanol a partir de residuales industriales.</p>	<p>8</p>
<p>Dr. Sebastian Verhelst</p>	<p>Ensayos en la cámara de combustión</p>	<p>8</p>

Departamento de Flujo, Calor y Mecánica de la Combustión. Grupo de Tecnologías del Transporte. Universidad de Gante, Bélgica.	para influencia de las propiedades del combustible en los parámetros de atomización. Formulación de emulsiones que involucran residuales industriales o combustibles alternativos. Modelación matemática relativa a determinar el número de cetano a partir de la composición de ácidos grasos.	
Dr. Leonardo Goyos Pérez Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.	Gestor fundamental de la célula de conocimientos en el uso de combustibles de segunda y tercera generación. Coautoría en varios de los trabajos terminados. Recibe un premio internacional por la gestión de proyectos, ciencia e instalaciones que han sido la génesis de todos nuestros resultados.	8
MSc. Yisel Sánchez Borroto Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.	Desarrolla modelos para predecir número de cetano usando redes neuronales de una amplia gama de biodiesel a partir de su composición en ácidos grasos. Desarrolla cultivos de microalgas	7
Dr. Pedro Rodríguez Ramos Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.	Desarrolla y lidera el estudio del impacto medio ambiental de la <i>Jatropha curcas</i> como biocombustible. Desarrolla y lidera el cultivo de microalga <i>Chlorella vulgaris</i> .	7
Dra. Danay Carrillo Nieves Facultad de Ingeniería Química Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.	Autora de tesis doctoral defendida exitosamente. Investiga en el uso de los residuos sólidos lignocelulósicos de la producción del VIMANG	6
MSc. Yosvany Díaz Domínguez Facultad de Ingeniería Química Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.	Formulación de emulsiones que involucran residuales industriales o combustibles alternativos. Patente. Conversión de los residuales de la industria aceitera en combustibles alternativos.	5

Resumen

Los trabajos de desarrollo y aplicación de combustibles alternativos en Cuba se reportan a partir de 1993 cuando se comenzó a trabajar la línea de desarrollo de emulsiones combustibles para su uso en motores. Hasta el 2000 se desarrollaron tensoactivos para estabilizar emulsiones y pruebas de banco y de camino. A partir del 2000 se comenzó a trabajar en las investigaciones relacionadas con las mezclas etanol-gasolina y a partir del año 2006 en el biodiesel, aceites vegetales y sus mezclas. Los resultados investigativos en el campo de los combustibles alternativos de los autores de esta propuesta datan de comienzos de 2007 y se consolidan a partir de la creación del grupo de investigaciones en Combustibles Alternativos de la Cujae en 2010. Varios miembros de esta propuesta fueron autores de la propuesta a premio ACC en 2012 (*Caracterización y evaluación de combustibles alternativos para su uso en Motores de Combustión Interna*). Dicha propuesta fue premio en 2013, la cual a diferencia de ésta, incluía combustibles alternativos de primera generación, aunque ya comenzaba a trabajar en los de segunda y tercera. La propuesta pasada no trataba aún resultados en el tema de las microalgas, ni el de microexplosión y formulaciones de emulsiones agua-combustible, así como tampoco ciclo de vida ni producción de etanol. Tampoco incluía resultados relativos al uso de la *Moringa oleífera* con fines energéticos. Por ello algunas de las líneas específicas declaradas en la presente propuesta y con resultados concretos son una continuidad de lo desarrollado o comenzado hasta 2012 en la propuesta anterior, pero la mayoría no.

Los resultados de la presente propuesta comprenden la publicación de un importante número de artículos en las principales bases de datos (14 en la web de las ciencias y 4 en Scopus), 5 Premios Internacionales, 8 Premios Nacionales, 1 defensa doctoral, 1 Patente y 1 Libro (que abarca resultados de investigaciones). Incluye 7 avales de aplicación, de potencial aplicación o de interés en los resultados. Entre los principales resultados obtenidos están: Formulación y evaluación de emulsiones con residuales industriales para su uso como combustibles alternativos, reduciendo carga contaminante. Producción de biomasa a partir de *Chlorella vulgaris* y su conversión en biodiesel. Modelos matemáticos para predecir el número de cetano de biocombustibles, retardo de la ignición y la tensión superficial. Matriz de evaluación del impacto ambiental de combustibles alternativos, demostrando la factibilidad del uso de la *Jatropha curcas* como combustible de segunda generación. Evaluación de la influencia del tipo de biocombustible y sus propiedades físicas en la atomización en la cámara de combustión, ofreciendo alternativas para mejorar la eficiencia de la combustión y mejor aprovechamiento de la energía. Conversión de etanol por vía fermentativa permitiendo disponer de información para acometer inversiones en plantas industriales, discriminando entre producir etanol por hidrólisis del bagazo o emplear este en la generación eléctrica a partir de su combustión.

Introducción

Los trabajos de desarrollo y aplicación de combustibles alternativos en Cuba se reportan a partir de 1993 cuando se comenzó a trabajar la línea de desarrollo de emulsiones combustibles (diesel-agua) para su uso en Motores de Combustión Interna. En una primera etapa que comprendió hasta el año 2000 se estuvieron desarrollando tensoactivos para estabilizar emulsiones y se estuvieron realizando pruebas de banco y de camino con las mismas en la entonces existente planta de emulsiones de la Cujae.

A partir del año 2000 se comenzó a trabajar en las investigaciones relacionadas con las mezclas etanol-gasolina y a partir del año 2006 en el biodiesel, aceites vegetales y sus mezclas. Los trabajos en esta línea se han continuado desarrollando abarcando la obtención, caracterización, análisis de ciclos de vida y sustentabilidad de las propuestas, modelación matemática relacionada con parámetros importantes que influyen en los procesos de combustión, análisis térmico, hasta su explotación en motores de combustión interna.

A pesar del enfoque que se le dio en Cuba en la década pasada al tema de los biocombustibles, este panorama ha ido cambiando toda vez que se conoce que los combustibles alternativos en la actualidad y las investigaciones y desarrollo de nuevos productos toman en consideración la competencia con la producción y el precio de los alimentos, así como el uso de terrenos cultivables aptos o no para producir alimentos [1-7]. Por ello, la producción de combustibles alternativos o biocombustibles a partir de desechos industriales o de fuentes no comestibles así como los combustibles alternativos de segunda, tercera y cuarta generación, son parte de una realidad que no se puede obviar cuando se quiera hacer un análisis objetivo de las ventajas y desventajas del empleo de estos en la economía y la sociedad [8-11]. Los biocombustibles de segunda generación son aquellos que no compiten con la producción de alimentos directamente (ej. *Jatropha curcas*) y los de tercera generación son aquellos que no compiten con la producción de alimentos pero tampoco utilizan terrenos aptos para cultivo alguno, utilizando un mínimo y a veces nulo espacio de tierra (ej. Microalgas).

Las investigaciones en este campo se han ido fortaleciendo con el paso del tiempo desde el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER) y de trabajos conjuntos de este centro de estudios con la Facultad de Ingeniería Química de la propia institución. El grupo de Combustibles Alternativos en colaboración con otros grupos de investigaciones de dicha universidad trabajan en la búsqueda de soluciones y de propuestas tentativas aplicables a la realidad cubana y en una escala tal que permita resolver problemas locales, haciendo más efectivos y aplicables los resultados que se derivan de nuestras investigaciones. Una parte de las investigaciones se ha

centrado en el estudio de combustibles alternativos para su uso en motores diesel y la otra parte en la producción de etanol, potencialmente para motores de gasolina.

Se ha trabajado en investigaciones relacionadas con aceites vegetales y sus mezclas, tomando como base la *Jatropha curcas*, la obtención de biodiesel a partir de desechos, análisis de ciclos de vida de las variantes estudiadas o de las soluciones resultantes de las investigaciones, modelación de propiedades y parámetros, emulsiones combustibles que involucran combustibles alternativos en la búsqueda de una mayor eficiencia de la combustión; biocombustibles de tercera generación como las microalgas, estudios profundos del fenómeno de la microexplosión, hasta el fundamental uso de estos en motores de combustión interna (MCI).

En la parte correspondiente al etanol como un biocombustible para motores de encendido provocado, esta propuesta incluye resultados de trabajos relativos a la evaluación de varias fuentes potenciales para la obtención de etanol como biocombustible de segunda generación, basado en su obtención a partir de residuales industriales, reduciendo carga contaminante y generando otras posibilidades energéticas para su uso. De los resultados obtenidos, fue posible disponer de información para acometer estudios de inversión en plantas industriales, discriminando entre producir etanol por hidrólisis del bagazo o emplear este en la generación eléctrica a partir de su combustión.

Los resultados alcanzados que sostienen esta propuesta comprenden la publicación de un importante número de artículos en las principales bases de datos del mundo (14 en la web de las ciencias y 4 en Scopus) [10, 12-16], 5 Premios Internacionales, 8 Premios Nacionales, 1 defensa doctoral, 8 maestrías defendidas, 1 Patente y 1 Libro (que abarca resultados de investigaciones).

La pertinencia y actualidad, así como la importancia de continuar trabajando en la obtención de resultados y desarrollo de tecnologías y productos de uso inmediato en el contexto cubano y con las tecnologías existentes se evidencian en el complejo contexto energético por el que precisamente hoy pasa nuestro país. No tiene Cuba suficiente petróleo para satisfacer sus necesidades, es incierto el suministro estable que hasta hoy se ha tenido, los precios del petróleo tarde o temprano retomarán su tendencia a un ascenso continuo y algunas de las fuentes y tecnologías energéticas renovables más conocidas y promovidas en Cuba y el mundo no pueden satisfacer hoy el sector energético vinculado al transporte automotor.

A pesar del debate sobre el tema de los combustible alternativos (básicamente enfocado en los de primera generación) con respecto a su competencia directa o indirecta con la producción de alimentos, cada vez queda más demostrada en el mundo la factibilidad de la producción de biocombustibles para la solución de problemas

energéticos locales y para la reducción de la carga contaminante generada también a nivel local o industrial y la relación directa entre incremento del precio de los alimentos básicos y la producción de biocombustibles no está tan clara y continua siendo material de debate y análisis (Ver Fig.1).



Fig.1 Alza de los precios de los alimentos y su relación con la producción de biocombustibles y precios del petróleo

Antecedentes

Los trabajos y resultados investigativos en el campo de los combustibles alternativos de los autores de esta propuesta datan de comienzos de 2007 y se consolidan a partir de la creación del grupo de investigaciones en Combustibles Alternativos de la Cujae a inicios de 2010. Los primeros resultados fueron presentados como propuesta de premio a la Academia de Ciencias de Cuba (ACC) en 2012, con el título *Caracterización y evaluación de combustibles alternativos para su uso en Motores de Combustión Interna*. Dicha propuesta fue premio ACC en 2013, la cual a diferencia de ésta, incluía combustibles alternativos de primera generación, aunque ya comenzaba a trabajar en los de segunda y tercera. La propuesta pasada no trataba aún resultados en el tema de las microalgas, ni el de microexplosion y formulaciones de emulsiones agua-combustible, así como tampoco ciclo de vida ni producción de etanol. Tampoco incluía resultados relativos al uso de la *Moringa oleífera* con fines energéticos. Por ello algunas de las líneas específicas declaradas en la presente propuesta y con resultados concretos son una continuidad de lo desarrollado o comenzado hasta 2012 en la propuesta anterior, pero otras no.

Sin embargo, ya los trabajos que se han desarrollado en el presente periodo no incluyen ningún combustible de primera generación y hemos consolidados nuestros

trabajos en los de segunda e introducido los de tercera. En el caso particular de la modelación matemática de propiedades de combustibles alternativos, en la propuesta de 2012 esta línea estaba aún en un estado incipiente y la continuidad y perfeccionamiento de la misma aporta varios artículos, la defensa de una tesis de maestría y varios resultados de diversa índole, incluyendo la disponibilidad de diversas herramientas matemáticas para predecir propiedades y parámetros de combustibles.

Problemas de investigación

Disponer de fuentes alternativas de energía para motores diesel que no compitan con la producción de alimentos ni el uso de tierra fértil.

Reducir la carga contaminante generada por industrias de refinación de aceite vegetal.

Lograr un mejor aprovechamiento de la energía en la combustión en MCI a través de una combustión más eficiente.

Disponer de información que permita acometer estudios de inversión en plantas industriales, discriminando entre producir etanol por hidrólisis del bagazo o emplear este en la generación eléctrica a partir de su combustión.

Disponer de una alternativa eficiente para la producción de etanol, que además permita disminuir el volumen de vinazas a la salida de la columna destiladora y sus efectos negativos al medio ambiente.

Objetivos

- Caracterizar física y químicamente los combustibles alternativos de segunda y tercera generación para su uso en MCI.
- Determinar cuáles son los combustibles alternativos más adecuados así como las condiciones de explotación óptimas de los MCI trabajando con estas fuentes alternativas de energía.
- Modelar matemáticamente algunos de los parámetros y propiedades más importantes de los combustibles alternativos y de su proceso de combustión que permitan un mejor aprovechamiento de estos combustibles.
- Convertir residuales industriales en biodiesel.
- Lograr un uso más eficiente de la energía en biocombustibles y sus mezclas mediante la formulación de emulsiones.
- Evaluar los ciclos de vida de las fuentes de combustibles alternativos más tentativas para su uso en MCI.
- Desarrollar un estudio de variantes que permita acometer inversiones en plantas industriales, discriminando entre producir etanol por hidrólisis del bagazo o emplear este en la generación eléctrica a partir de su combustión.

- Disminuir el volumen de vinazas a la salida de la columna destiladora y sus efectos negativos al medio ambiente, con producción de etanol de manera eficiente.

Principales resultados obtenidos

- Formulación y evaluación de emulsiones que involucran grasas animales y residuales industriales con vistas a un uso de los mismos como combustibles alternativos, reduciendo carga contaminante generada por los mismos y evitando en algunos casos la transesterificación.
- Producción de biomasa a partir de cultivos con *Chlorella vulgaris* en diferentes condiciones experimentales para la extracción de aceite y posterior conversión en biodiesel.
- Se ha logrado mediante el uso de la modelación matemática, modelos que permiten mediante la determinación de la composición química de ácidos grasos de un biodiesel dado, estimar su número de cetano, propiedad importante de los combustibles y estrechamente relacionada con el tiempo de retardo de la ignición y la tensión superficial de diferentes tipos de combustibles alternativos para motores diesel.
- A través de los análisis de ciclo de vida y de factibilidad se demuestra la ventaja del uso de la *Jatropha curcas* con respecto a otros combustibles. A partir de estos estudios fue posible la obtención de una matriz de evaluación del impacto medioambiental de diferentes tipos de combustibles alternativos con el fin de generar trabajo útil en MCI, demostrando la factibilidad del uso de la *Jatropha curcas* como combustible de segunda generación.
- Se determina la influencia del tipo de biocombustible y sus propiedades físicas en los parámetros de la atomización del mismo en la cámara de combustión, ofreciendo alternativas para mejorar la eficiencia de la combustión y mejor aprovechamiento de la energía cuando estos son empleados en motores diesel, así como indicios de la ocurrencia del fenómeno de microexplosión.
- Se han identificado y caracterizado todos los residuales del proceso de refinación de los aceites vegetales para consumo humano, que tienen bajo valor comercial y generan un problema de contaminación y se trabaja continuamente en su conversión y uso en motores diesel como biocombustibles.
- Los estudios de conversión de etanol por vía fermentativa permitieron disponer de información que permite a los inversores y decisores, acometer inversiones

en plantas industriales, discriminando entre producir etanol por hidrólisis del bagazo o emplear este en la generación eléctrica a partir de su combustión.

- Patente de procedimiento que permite obtener un combustible emulsionando un residual industrial proveniente de la industria de refinación de aceites vegetales.
- Obtención de biodiesel de *Jatropha curcas* y *Moringa oleífera*, mediante estudios que abarcan desde la etapa del procesamiento de la biomasa hasta las pruebas en MCI.

Colaboradores Científicos

- Dr. Roger Sierens (Departamento de Mecánica de la Combustión, Facultad de Ingeniería, Universidad de Gante, Bélgica)
- Dr. Jonas Galle (Departamento de Mecánica de la Combustión, Facultad de Ingeniería, Universidad de Gante, Bélgica)
- Dr. Magín Lapuerta (Universidad de Castilla La Mancha, España)
- Dr. Jordi Roger-Ribac (Universitat Politècnica de Catalunya, España)
- Dr. Alan Christopher Hansen (University of Illinois at Urbana Champaign, EUA)
- Ing. Indira Tobio Pérez (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Ing. Danger Tabio García (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Ing. Maylín Rondón Macías (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Dra. Elina Fernández Santana (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Dra. Susana Rodríguez Muñoz (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Dra. Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas (Facultad de Ingeniería Química. Cujae)
- Lic. Cándida Ferrer (CETER, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cujae)
- MSc. Martha Mazorra Mestre (CETER, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cujae)

Logros fundamentales en el período comprendido entre 2013-2017

Publicación de artículos en la Web de las Ciencias (14)

1. Effect of emulsified fuels based on fatty acid distillates on single cylinder diesel engine performance and exhaust emissions. **Applied Thermal Engineering**. (2017).120. 187-195. Eliezer Ahmed Melo, Ramón Piloto, Yisel Sánchez, Sebastian Verhelst.
2. Dehydration of ethanol using protic ionic liquids. **Afinidad. Revista de Química Teórica y Aplicada** (2017). 579, 200-205. Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui.
3. Assessment of diesel engines fueled with derivate from algae and microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. (2017). 69, 833-842. Ramón Piloto, Yisel Sánchez, Eliezer Ahmed Melo, Sebastian Verhelst.
4. Extraction and characterization of oil from *Moringa oleifera* for energy purposes. **Wulfenia Journal**. (2017) 24 (5). 86-103. Yosvany Díaz, Danger Tabio, Leonardo Goyos, Elina Fernández, Susana Muñoz, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.
5. Caracterización del biodiesel obtenido del aceite de *Jatropha curcas* L. (aceptado en septiembre 2017 para publicar en **Afinidad. Revista de Química Teórica y Aplicada**). Pedro Rodríguez, Eliezer Ahmed Melo, Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez, Ramón Piloto.
6. Emulsified fuels based on fatty acid distillates and rapeseed oil: A physicochemical characterization. **Fuel** (2016).185, 734-742. Eliezer Melo, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.
7. Enzymatic hydrolysis of chemically pretreated mango stem bark residues at high solid loading. **Industrial Crops and Products** (2016) 83, 500-508. Danay Carrillo, Lourdes Zumalacárregui.
8. Emulsification of animal fats and vegetable oils for their use as a diesel engine fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** (2015) 47, 623-633. Eliezer Ahmed Melo, Ramón Piloto, Leonardo Goyos.
9. Emulsification of waste cooking oils and fatty acid distillates as diesel engine fuel. **Proceedings of the ICEE**. 2nd International Conference on Energy and Environment. (2015) 354-365. Eliezer Melo, Ramón Piloto, Leonardo Goyos, Sebastian Verhelst
10. Obtención de biomasa de microalga *Chlorella vulgaris* en un banco de prueba de fotobiorreactores de columna de burbujeo. **Afinidad. Revista de Química Teórica y Aplicada** (2015) 574, 125-129. Pedro Rodríguez, Yunior Sánchez, Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez.
11. Impacto medioambiental del aceite de *Jatropha curcas* utilizado como biocombustible. **Revista de Ingeniería Química del Uruguay** (2014) 33-40.

Pedro Rodríguez, Leonardo Goyos, Ramón Piloto, Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez.

12. Conversion of by-products from the vegetable oil industry into biodiesel and its use in internal combustion engines. ***Brazilian Journal of Chemical Engineering*** (2014) 31 (2), 287-301. Ramón Piloto, Eliezer Ahmed Melo, Leonardo Goyos, Sebastian Verhelst.
13. Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression. ***Energy Conversion and Management*** (2013) 65, 255-261. Ramón Piloto, Yisel Sánchez, Leonardo Goyos, Magín Lapuerta, Sebastian Verhelst.
14. Experimental investigation concerning the influence of fuel type and properties on the injection and atomization of liquid biofuels in an optical combustion chamber. ***Biomass and Bioenergy*** (2013) 57, 215-228. Jonas Galle, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.

De la lista de publicaciones en la web de las ciencias 8 artículos (57%) corresponden a publicaciones en revistas de alto factor de impacto: *Applied Thermal Engineering*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Fuel*, *Industrial Crops and Products*, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *Energy Conversion and Management*, *Biomass and Bioenergy*.

Adicionalmente a estos artículos publicados en la Web de las Ciencias, hay 5 artículos en proceso de arbitraje en la misma base de datos:

- Experimental investigation on emulsified fuels produced with a microchannel emulsifier: Puffing and micro-explosion analyses. ***Fuel***. (Enviado en septiembre 2017). Eliezer Ahmed Melo, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.
- Simulación de la destilación extractiva con sales para la obtención de etanol deshidratado ***Revista Mexicana de Ingeniería Química***. Yeney Lauzurique, Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui, Dalia Rojas.
- Characterization and engine emissions evaluation of biodiesel of fatty acid distillates from the soybean oil industry. ***Environmental Progress and Sustainable Energy***. (Enviado en noviembre de 2016). Yosvany Díaz, Eliezer Ahmed Melo, Leonardo Goyos, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.
- Green-filamentous macroalgae *Chaetomorpha cf. gracilis* from Cuban wetlands as a feedstock to produce alternative fuel: A physicochemical characterization. (Enviado en septiembre de 2017). ***Fuel***. Yisel Sánchez, Eliezer Melo, Indira Tobío, Ramón Piloto.

- Análisis de los principales factores en el alza de los precios de los alimentos. (Enviado en junio de 2017). **Revista Lasallista de Investigación**. Marianela Ortiz, Ramón Piloto.

Publicación de artículos en SCOPUS (4)

- Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol aplicando la simulación. **DYNA** (2017) 84 (200), 185-192. Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez, Geli Molina.
- Emulsification of Waste Cooking Oils and Fatty Acid Distillates as Diesel Engine Fuels: An Attractive Alternative. **International Journal of Sustainable Energy Planning and Management**. (2016) 9, 3-16. Eliezer Ahmed Melo, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.
- Surface tension prediction of vegetable oils using artificial neural networks and multiple linear regression. **Energy Procedia** (2014) 57, 886-895. Eliezer Ahmed Melo, Yisel Sánchez, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.
- Prediction of cetane number and ignition delay of biodiesel using Artificial Neural Networks. **Energy Procedia** (2014) 57, 877-885. Yisel Sánchez, Ramón Piloto, Sebastian Verhelst.

Adicionalmente, hay otros 2 en proceso en la misma base de datos:

- Performance of a single cylinder diesel engine using water-in diesel emulsion stabilized by a nonyl phenol based surfactant. Eliezer Ahmed Melo, Ramón Piloto. **Alexandria Journal of Engineering** (enviado en Abril 2014). Eliezer Ahmed Melo, Ramon Piloto, Sebastian Verhelst.
- Evaluación de condiciones experimentales básicas para la producción de biomasa a partir de la microalga *Chlorella vulgaris*. **Revista Ra Ximhai**. (enviado en Enero 2016). Yisel Sánchez, Indira Tobio, Yosvany Díaz, Ramón Piloto.

Publicación de artículos en revistas indexadas

Se publicaron 22 artículos en revistas indexadas de reconocido prestigio nacional o internacional.

1. Análisis comparativo de métodos de balance exergético en columnas de destilación alcohólica. **Revista Centro Azúcar**. 44 (2): 48-59 (2017) Arletis Cruz, Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui.
2. Empleo de semillas de *Moringa oleífera* en el tratamiento de residuales líquidos. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**. 38 (2): 87-101 (2017) Maylín Rondón, Yosvany Díaz, Susana Rodríguez, Elina Fernández, Danger Tabio.

3. Extraction and characterization of *Moringa oleífera* seed oil from Cuba. **Revista CNIC Ciencias Químicas** (Aceptado para publicar desde Febrero 2017). Yosvany Díaz, Danger Tabio, Maylín Rondón, Elina Fernández, Susana Muñoz, José María Ameneiros, Ramón Piloto.
4. Simulación de la destilación por cambio de presión para obtener etanol deshidratado **Centro Azúcar**. 43: 90-98 (2016). Yeney Lauzurique, Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez Ones.
5. Alternativas tecnológicas para reducir el volumen de vinazas y su tratamiento. **Centro Azúcar**. 43: 70-79 (2016). Dania Alonso, Norge Garrido, Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui.
6. Simulación de la destilación extractiva para la obtención de etanol anhidro empleando glicoles. **Ciencia, Docencia y Tecnología**. 27 (53): 362-383 (2016). Yeney Lauzurique, Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez, Aloimy Curbelo.
7. Deshidratación de etanol empleando líquidos iónicos. **Universidad, Ciencia y Tecnología** 20 (80): 124-133 (2016). Lidersi Acosta, Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui.
8. Influencia de la presión y la humedad en la potencia eléctrica. **Ingeniería** 26 (2): 51-64, (2016). Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui, Pedro Rodríguez.
9. Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. **Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología**, 16 (3): 407-418 (2015). Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez, Pedro Rodríguez.
10. Alternativas tecnológicas para reducir el efecto ambiental de las vinazas de la industria alcoholera. **Revista ICIDCA**, Vol. 49, No.2, 44-49 (2015). Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui.
11. Aplicación de crudos enzimáticos de origen fúngico en la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar. **Revista ICIDCA**, Vol.49, No.3, 9-10 (2015). Zurima Méndez, Julio Dustet, Lourdes Zumalacárregui.
12. By-products from the vegetable oil industry as a feasible source for biofuels production and pollution reduction. **Renewable Energy & Power Quality Journal**. ISSN 2172-038 X, No.12 (2014). Ramón Piloto, Eliezer Melo, Leonardo Goyos.
13. Performance of a single cylinder diesel engine fuelled with emulsified residual oleins and standard diesel fuel. **Renewable Energy & Power Quality Journal**. ISSN 2172-038 X, No.12 (2014). Eliezer Melo, Ramón Piloto, Leonardo Goyos.
14. Determinación del número de cetano del biodiesel a partir de su composición de ácidos grasos mediante regresión lineal múltiple y redes neuronales artificiales. **Revista CNIC Ciencias Químicas**. (2014) 45: 73-76. Yisel Sánchez.
15. Hidrólisis química y digestión anaerobia termofílica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. **Revista Cubana de Ingeniería**. (2014), 5 (1): 1-8. Yosvany Díaz, Elina Fernández, Susana Rodríguez.
16. Pretreatments employed in lignocellulosic materials for bioethanol production: An overview. **Revista ICIDCA**, 48 (1): 71-79 (2014). Danay Carrillo, Lourdes Zumalacárregui.
17. Caracterización de un motor diesel trabajando con mezclas de aceite de *Jatropha* y combustible diesel. **Ingeniería Energética**. 34 (3): 198-207 (2013). Ramón Piloto, Eliezer Melo, Leonardo Goyos.

18. Caracterización del comportamiento de un motor monocilindrico de encendido por compresión usando combustible emulsionado. **Revista CNIC Ciencias Químicas**. (2013) 44: 96-101. Eliezer Melo.
19. Investigación experimental de las prestaciones de un motor monocilíndrico usando combustible diesel emulsionado. **Ingeniería Energética**. 34 (1): 11-20 (2013). Eliezer Melo, Ramón Piloto, Leonardo Goyos.
20. Prediction of cetane number of biodiesel from its fatty acid ester composition using Artificial Neural Networks. **Renewable Energy & Power Quality Journal**. ISSN 2172-038 X, No.11 (2013). Ramón Piloto, Yisel Sanchez, Leonardo Goyos.
21. Engine performance of a single cylinder direct injection diesel engine fuelled with blends of Jatropha Curcas oil and standard diesel fuel. **Renewable Energy & Power Quality Journal**. ISSN 2172-038 X, No.11 (2013). Ramón Piloto, Eliezer Melo, Leonardo Goyos.
22. Cálculo del impacto medioambiental de la producción de biocombustibles derivados del aceite de Jatropha curcas. **Revista Cubana de Ingeniería**. (2013), 4 (1): 51-58. Pedro Rodríguez.

Premios obtenidos

Premios Internacionales

Todos los premios que se listan a continuación fueron otorgados a autores de la propuesta y están vinculados directamente a los resultados que se muestran en la misma:

1. Premio Internacional otorgado por la Universidad de Gante, Bélgica al Prof. Leonardo Goyos por los aportes a la investigación y proyectos de investigaciones desarrollados en 20 años (2013).
2. Mejor Ponencia en la Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía, CIER (2017). Experimental investigation on emulsions as diesel engine fuel. Eliezer Ahmed Melo, Yisel Sánchez, Ramón Piloto.
3. Mejor Ponencia en la Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía, CIER (2017). Comportamiento reológico de aceite y biodiesel de moringa oleífera. Yosvany Díaz, Danger Tabio, Maylin Rondón, Ramón Piloto.
4. Mejor Poster en la Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía, CIER (2017). Biodiesel obtenido a partir de jaboncillo proveniente de la refinación de aceites vegetales. Indira Tobio, Yosvany Díaz, Ramón Piloto.
5. Mejor Poster en la Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía, CIER (2017). Evaluación del proceso de secado de la macroalga *Chaetomorpha cf. gracilis* utilizando un secador solar y secado solar y una estufa eléctrica. Yisel Sánchez, Ahmed Melo, Ramón Piloto.

Premios Nacionales

1. Sello Forjadores del Futuro (Categoría de Personalidad). Lourdes Zumalacárregui (2017).
2. Sello Forjadores del Futuro. Indira Tobio Pérez (2017).
3. Medalla Carlos J. Finlay a Lourdes Zumalacárregui (2016).
4. Sello Forjadores del Futuro. Eliezer Ahmed Melo (2016).
5. Sello Forjadores del Futuro. Yosvany Díaz (2016).
6. Logro ICIDCA. Evaluación de alternativas de mejoras energéticas y ambientales en la destilería Jesús Rabí. Osney Pérez y Lourdes Zumalacárregui (2015).
7. Sello Forjadores del Futuro. Yisel Sánchez (2014).
8. Sello Forjadores del Futuro. Eliezer Ahmed Melo (2013).

Premios institucionales

1. Premio al trabajo que refleja el avance científico de mayor trascendencia y originalidad. Premio Cujae. “Aplicación de técnicas de análisis de procesos para mejoras tecnológicas y energéticas en la producción de biocombustibles” (2015). Facultad de Ingeniería Química e Ingeniería Mecánica.
2. Premio Cujae al Mérito Científico-Técnico al Resultado ya Aplicado Más Útil a la Educación Superior: “Contribución del simulador de procesos STA al aprendizaje de los alumnos de pregrado y postgrado en carreras de ingeniería durante los últimos veinte años”. Héctor Pérez de Alejo, Osvaldo Gozá, Osney Pérez, Yurisnel Corrales, Tomás Curbelo, Alain Pérez, Rigoberto Marrero, Lourdes Zumalacárregui, Yoandrys González (2015).
3. Logro científico del ICIDCA 2015 Evaluación de alternativas energéticas y ambientales en la destilería Jesús Rabí. Dania Alonso, Norge Garrido, Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui (2015).
4. Premio al Mérito Científico-Técnico al Colectivo de Investigación más Destacado en el Trabajo de Investigación y en la Promoción de los Procesos Innovativos (Investigaciones Integrales de Bioprocesos). Cujae (2013).
5. Grupo de investigaciones destacado a nivel de Cujae (2015). Combustibles Alternativos.
6. Grupo de investigaciones destacado a nivel de Cujae (2013). Combustibles Alternativos.

Patente

Una de las líneas de investigación en desarrollo por el grupo de investigaciones es el empleo de residuales industriales para la producción de combustibles alternativos en aras de reducir la contaminación ambiental que estos generan y contribuir a la eficiencia energética de la propia industria. Otra línea desarrollada es la formulación y uso de emulsiones combustibles con vistas a mejorar el proceso de combustión y las prestaciones de los motores diesel.

De estas dos líneas de investigación se ha obtenido un resultado que se encuentra en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI) como solicitud oficial de patente (ver documento anexo).

- Procedimiento para la obtención de combustibles emulsionados a partir de destilados de ácidos grasos. Patente CU2015000069 (2017). Solicitud Oficial No. 2015-0069. Ramón Piloto, Yosvany Díaz, Eliezer Ahmed Melo.

Tesis de doctorado

Defensa de doctorado

Obtención de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos del proceso de producción de VIMANG en Cuba.

Aspirante: Danay Carrillo Nieves.

Tutora: Lourdes Zumalacárregui.

Este tema doctoral defendido exitosamente en México en febrero de 2016, corresponde a una investigación desarrollada casi en su totalidad en Cuba, con una parte del trabajo experimental desarrollado en la institución foránea. La defensa fue desarrollada en dicha institución por la aspirante Danay Carrillo, de la Cujae y con la autorización de nuestra institución.

La corteza de mango después de la maceración constituye un residuo sólido lignocelulósico de la producción del VIMANG®, que no se dispone adecuadamente. Se estudió a nivel de laboratorio su utilización como fuente para la producción de bioetanol. Este estudio se realizó entre la Facultad de Ingeniería Química de la Cujae y la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Coahuila, en donde se defendió dentro del Programa de Ciencia y Tecnología de Alimentos con tutoría compartida.

Las características estructurales del material demandan de un pretratamiento para aumentar la biodegradabilidad de la fracción orgánica. El material se sometió a ataque enzimático para la obtención de azúcares, los que se convierten en etanol y otros productos. Se evaluaron tres configuraciones con apoyo del diseño de experimentos: hidrólisis y fermentación separadas: sacarificación y fermentación simultáneas y presacarificación seguida de sacarificación y fermentación simultáneas. Se propuso una planta de producción de bioetanol a escala de banco. Se analizaron alternativas para compensar los costos de producción, como la utilización del residuo de lignina obtenido después de la hidrólisis alcalina.

Los principales resultados se resumen en: con la hidrólisis alcalina con NaOH se obtienen mejores resultados que con la hidrólisis ácida con ácido fosfórico diluido con niveles superiores de contenido de glucanos y una solubilización selectiva de la lignina a partir del material pretratado. El rendimiento mayor en la hidrólisis enzimática fue de 15% en relación con la carga de sustrato. Los mejores resultados se obtuvieron con la configuración compuesta por sacarificación y fermentación simultánea. Con un tiempo de residencia de dos días en el reactor de sacarificación y fermentación simultánea y 15 minutos de pretratamiento alcalino, el estimado del costo de producción es de 1,23 USD/L de bioetanol.

A pesar de no contar con más defensas de tesis doctorales en esta propuesta, es necesario señalar que se desarrollan siete trabajos de doctorado, con el tema doctoral debidamente inscrito y aprobado. El avance de las investigaciones realizadas hacia la solución de problemas específicos de investigaciones y tributando al incremento del nivel académico de cada uno de nuestros profesores e investigadores, se ve también en el número de tesis de maestrías defendidas.

Doctorados en desarrollo

1. Evaluación del comportamiento de motores diesel utilizando como combustible a sistemas disperses agua-aceite. Autor: Eliezer Ahmed Melo. Tutores: Ramón Piloto y Leonardo Goyos Pérez.
2. Hidrólisis enzimática del bagazo de caña de azúcar para la producción de etanol aplicando enzimas cubanas. Autora: Zurima Menéndez Ramírez. Tutores: Julio Dustet, Lourdes Zumalacárregui.
3. Contribución al estudio de la obtención de etanol anhidro por destilación extractiva usando líquidos iónicos. Autora: Lidersi Acosta Cordero. Tutores: Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui.
4. Modelación matemática y simulación de procesos de separación en la producción de etanol anhidro para incrementar la eficiencia energética. Autora: Ing. Yeney Lauzurique Guerra. Tutores: Osney Pérez, Lourdes Zumalacárregui.

5. Caracterización de la combustión y las prestaciones de un motor Diesel utilizando biocombustibles derivados de microalga *Chlorella vulgaris*. Autora: Yisel Sánchez Borroto. Tutor: Ramón Piloto.
6. Caracterización del proceso de combustión empleando ésteres metílicos de Moringa oleífera. Autor: Yosvany Díaz. Tutores: Elina Fernández.
7. Evaluación de un motor diesel trabajando con mezclas carburantes derivadas de oleínas residuales. Autora: Nayvi Ferrer Frontela. Tutor: Ramón Piloto.
8. Evaluación emergética del impacto ecológico de biodiesel procedente de *Jatropha curcas*. Autor: Didiet Corvea. Tutor: Pedro Rodríguez.
9. Viabilidad e implantación de la biotecnología para el secuestro de CO₂: estudio de caso. Autor: Marco Antonio Bertini. Tutor: Pedro Rodríguez (se desarrolla en Brasil).

Tesis de maestría defendidas

- Factibilidad de una flota de taxis eléctricos Nissan Leaf en La Habana siendo recargados con energía eólica y fotovoltaica (2017). Tutor: Dr. Ramón Piloto.
- Deshidratación de etanol empleando líquidos iónicos de naturaleza prótica (2016). Tutores: Dr. Osney Pérez, Dra. Lourdes Zumalacárregui.
- Modelación matemática y simulación de procesos de separación en la producción de etanol anhidro para incrementar la eficiencia energética (2015). Tutores: Dr. Osney Pérez y Dra. Lourdes Zumalacárregui.
- Producción y caracterización del biodiesel obtenido de *Jatropha curcas* y *Chlorella vulgaris* como combustible para motores diesel (2015). Tutor: Dr. Pedro Rodríguez.
- Determinación del número de cetano del biodiesel a partir de su composición de ácidos grasos utilizando regresión lineal múltiple y redes neuronales artificiales. (2014). Tutor: Dr. Ramón Piloto.
- Caracterización del comportamiento de un motor mono-cilíndrico de encendido por compresión usando combustible emulsionado. (2013). Tutor: Dr. Ramón Piloto.
- Caracterización de ensayos en un banco de motores diesel empleando aceite de *Jatropha curcas* y combustible diesel. (2013). Tutor: Dr. Ramón Piloto.
- Posibilidad de utilización de mezclas de Oleína residual con diesel como combustible en el equipamiento especial para el servicio a la aviación. (2013). Tutor: MSc. Nayvi Ferrer.

Tesis de Diploma defendidas

- Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol para la obtención de etanol anhidro aplicando la simulación (2017).
- Diseño de procesos flexibles para la producción de etanol a partir de diferentes materias primas (2017).
- Diseño y simulación de un fotobiorreactor de columnas de burbujas para el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* (2017).
- Modelación de número de cetano y de retardo de la ignición mediante el uso de redes neuronales artificiales (2017).
- Obtención de biodiesel a partir de jaboncillo proveniente de la industria de refinación de aceites vegetales (2017).
- Biodiesel obtenido a partir de destilados de ácidos grasos (2017).
- Investigación experimental sobre la ocurrencia de los fenómenos de deformación de la superficie y microexplosión de combustibles emulsionados basados en una mezcla de aceite de colza en combustible diesel (2017).
- Propuesta de mejora tecnológica en la Ronera Havana Club (2017).
- Propuestas de mejoras en la Ronera Havana Club (2017).
- Obtención de un modelo neuronal para la predicción de la concentración de etanol (2017).
- Modelación del equilibrio líquido-vapor a presión constante de mezclas etanol-agua utilizando redes neuronales artificiales (2017).
- Evaluación de las prestaciones de un motor diesel trabajando con combustible derivado de *Chlorella vulgaris* (2016).
- Combustible emulsionado obtenido de un cultivo residual de microalga *Chlorella vulgaris* (2016).
- Caracterización del comportamiento de un motor mono-cilíndrico Lister Petter PH1W utilizando combustible emulsionado basado en destilados de ácidos grasos (2016).
- Determinación de la viscosidad cinemática de aceites vegetales a partir de la composición de ácidos grasos utilizando redes neuronales artificiales (2016).
- Estudio comparativo de métodos de balance exergético en columnas de destilación alcohólica (2016).
- Diseño preliminar de una planta de producción de etanol hidratado que opere de manera multipropósito a partir de materias primas amiláceas y azucaradas (2016).
- Obtención de Biodiesel a partir de ácidos grasos destilado provenientes de la industria aceitera cubana (2015).
- Sistemas dispersos obtenidos a partir de subproductos de la industria aceitera cubana (2015).

- Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol para la obtención de etanol anhidro aplicando la simulación (2014).
- Evaluación de ciclos de potencias para la producción de electricidad a partir de una mezcla etanol-agua utilizando la simulación (2013).
- Evaluación de diferentes tecnologías para el tratamiento de vinazas de destilerías de etanol (2013).

Publicación de Libro

Uno de los aspectos que ha caracterizado los resultados de investigaciones relativos a esta propuesta es la divulgación de conocimientos y de resultados de investigaciones en cada una de las líneas de investigaciones. Esto queda evidenciado mediante la publicación de un total de 50 artículos en los últimos cuatro años, la participación en al menos 70 trabajos en eventos en igual período, pero también en la publicación de un libro con tirada en copia dura y digital, distribuido gratuitamente por el país, lo cual contribuye a diseminar por el país y el exterior los resultados de investigaciones en desarrollo y la caracterización de este tipo de combustibles alternativos. El libro fue publicado en enero de 2014.

A continuación se relacionan los capítulos publicados como parte del libro Biocombustibles para su uso en Motores Diesel, editado por el IDICT [17], con una tirada de 300 ejemplares y con ISBN 978-959-234-095-4.

1. El escenario energético cubano. Los combustibles alternativos. Experiencias, potencialidades y perspectivas futuras. E. Melo, Yisel Sánchez, R. Piloto.
2. Caracterización físico-química de biocombustibles. Análisis Térmico. R. Piloto.
3. Influencia de la composición de ácidos grasos de biocombustibles en propiedades y parámetros. Yisel Sánchez, R. Piloto, E. Melo, L. Goyos.
4. La emulsificación de los aceites vegetales y las grasas animales como combustible para motores diesel. Una visión general. E. Melo, R. Piloto, L. Goyos.
5. Retardo de la ignición en la combustión de biocombustibles. R. Piloto.
6. Potencial de la Moringa oleífera para la producción de biodiesel. Yosvany Díaz.
7. Impacto de los biocombustibles sobre la durabilidad de los motores. L. Goyos.
8. Uso de oleínas residuales en motores de combustión interna. R. Piloto.
9. Microalgas. Potencial de producción de biocombustibles. R. Piloto.
10. Análisis de ciclo de vida de biocombustibles. P. Rodríguez, O. Pérez, L. Zumalacarregui.

Publicación de Monografías

- Obtención de biodiesel a partir de aceites de origen vegetal. ISBN 978-959-261-554-0 (2017).
- Extracción de aceites de origen vegetal. ISBN 978-959-261-553-3 (2017).
- Redes neuronales artificiales y algunas aplicaciones en energía. ISBN 978-959-261-555-7 (2017).
- Biodiesel a partir de desechos de la industria de refinación de aceites vegetales. ISBN 978-959-261-496-3 (2016).
- Procedimientos para el estudio de las prestaciones y emisiones de un motor diesel mono-cilíndrico Lister Petter. ISBN 978-959-261-493-2 (2016).

Trabajos presentados en congresos

Trabajos presentados en congresos de prestigio internacional (más alto nivel)

El mes pasado (septiembre 2017) fue presentado en el congreso de más nivel en atomización **ILASS–Europe, 28th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems** un trabajo con los resultados del estudio de la atomización y la influencia del contenido de agua en el cono de atomización en la cámara de combustión.

En junio de 2017 se participó con un trabajo en el **9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics**, en Brasil. Este es el congreso más importante del mundo en dicha temática.

En 2015 se logra la aceptación y participación con un trabajo en uno de los congresos a nivel mundial de más prestigio en Energía y Medio Ambiente, celebrado en Portugal. **International Conference on Energy and Environment: bringing together Engineering and Economics.**

En abril de 2014 se llevó a cabo en Córdoba, España la Conferencia Internacional de Energía Renovable y Eficiencia Energética (**International Conference on Renewable Energies and Power Quality**). Esta vez participaron 37 trabajos representando a Latinoamérica. En este congreso dos autores de esta propuesta participaron con sendos trabajos que representaban investigaciones ya desarrolladas por este colectivo.

En marzo de 2013 se llevó a cabo en Bilbao, España la Conferencia Internacional de Energía Renovable y Eficiencia Energética (**International Conference on Renewable Energies and Power Quality**), congreso de alto prestigio internacional, en el cual solo participaron 4 trabajos representando a Latinoamérica. En este congreso se logró la participación de dos trabajos que representaban investigaciones del colectivo.

También en 2013 se participó, en la **Conferencia Mundial de Energía Solar y energías afines**, celebrada en Cancún, México, donde dos trabajos nuestros fueron presentados en la comisión especial correspondiente a otras fuentes renovables de energía.

Trabajos presentados en congresos internacionales

A continuación se relacionan los congresos más importantes en que se ha participado desde 2013:

1. Experimental investigation on puffing and micro-explosion occurrence of water in rapeseed oil emulsions droplets. Effect of the surfactant concentration. ILASS–Europe, 28th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 6-8 September 2017, Valencia, Spain (2017).
2. An experimental comparison between two methods for biofuels emulsification. 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamic. Iguazu Falls, Brazil (2017).
3. Producción e impacto medioambiental del aceite de *Ricinus communis L.* con fines biocombustibles. Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
4. Experimental investigation on emulsions as diesel engine fuel. Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
5. Predicción del retardo de la ignición de biodiesel en un motor diesel mediante redes neuronales artificiales Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
6. Comportamiento reológico de aceite y biodiesel de moringa oleífera Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
7. Comportamiento de mezclas de ácidos grasos destilados con combustible diesel en un motor diesel Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
8. Caracterización química, física y microbiológica de vinazas de destilerías. Diversificación. 16-30 junio 2017 (2017).
9. Efecto de la temperatura en la hidrólisis enzimática del bagazo de caña de azúcar con crudos enzimáticos de origen cubano. Diversificación. 16-30 junio 2017 (2017).
10. Obtención de biodiesel de moringa oleífera Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
11. Análisis de los principales factores en el alza de los precios de los alimentos Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
12. Cuban current trends and knowledge on alternative fuels for use in internal combustion engine Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
13. Biodiesel obtenido a partir de jaboncillo proveniente de la refinación de aceites vegetales Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).

14. Evaluación del proceso de secado de la macroalga *Chaetomorpha cf. gracilis* utilizando un secador solar y secado solar y una estufa eléctrica Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
15. Green-filamentous macroalgae *Chaetomorpha cf. gracilis* from Cuban wetlands as a feedstock for diesel engine fuel improver Conferencia Internacional de Fuentes Renovables de Energía CIER 2017 (2017).
16. Simulación de los procesos de extracción de β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol a partir de *Dunaliella salina*. IV Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA) en el marco de la XVIII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA), Cujae. La Habana, Cuba (2016).
17. Deshidratación de etanol empleando líquidos iónicos de naturaleza prótica. 18 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura CIIQBA 2016. La Habana, Cuba (2016).
18. La obtención de etanol deshidratado aplicando la simulación de procesos. 18 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura CIIQBA 2016. La Habana, Cuba (2016).
19. Caracterización del biodiesel obtenido del aceite de *Jatropha curcas L* para motores diesel. IX Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medio Ambiente, (SUIMA) en el marco de la XVIII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA), Cujae, La Habana, Cuba (2016).
20. Hidrólisis enzimática utilizando mezclas de enzimas celulasas de origen cubano. IV Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA 2016).
21. Emulsiones combustibles a partir de un cultivo de *Chlorella vulgaris*. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. Habana, Cuba (2016).
22. Variantes para el empleo de destilados de ácidos grasos como combustible para motores diésel. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. Habana, Cuba (2016).
23. Combustibles emulsionados basados en destilados de ácidos grasos para su aplicación en motores diésel. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. Habana, Cuba (2016).
24. Determinación de la viscosidad cinemática de aceites vegetales a partir de la composición de ácidos grasos utilizando redes neuronales artificiales. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. Habana, Cuba (2016).
25. Viscosidad de esteres metílicos de *Moringa oleífera*. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. Habana, Cuba (2016).
26. Obtención de esteres metílicos de *Moringa oleífera*. Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica. Habana, Cuba (2016).
27. Emulsified systems for biofuels. Assessment of their performance on diesel engines. Universidad 2016. Habana, Cuba (2016).
28. Estudio comparativo de métodos de balance exergético en columnas de destilación alcohólica. V Simposio Internacional de Química, SIQ'16, Cayo Santa María, Cuba (2016).

29. Evaluación termodinámica del proceso de destilación artesanal de mostos de Agave cocui. V Simposio Internacional de Química, SIQ'16, Cayo Santa María, Cuba (2016).
30. Simulación del proceso de destilación artesanal de cocuy pecayero. V Simposio Internacional de Química, SIQ'16, Cayo Santa María, Cuba (2016).
31. Simulación de la destilación por cambio de presión para obtener etanol deshidratado. V Simposio Internacional de Química, SIQ'16, Cayo Santa María, Cuba (2016).
32. Emulsification of waste cooking oils and fatty acid distillates as diesel engine fuel. 2nd International Conference on Energy and Environment: bringing together Engineering and Economics, Guimarães, Portugal. DOI: 10.13140/RG.2.1.4367.4724 (2015).
33. Comparación entre diferentes configuraciones de proceso para la producción de bioetanol a partir de residuos de cortezas de árboles de mango. XVI Congreso de Biotecnología y Bioingeniería, Guadalajara, México (2015).
34. Evaluación de la destilación extractiva empleando glicoles. XIII Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados de la Caña, DIVERSIFICACIÓN 2015 (2015).
35. Aplicación de crudos enzimáticos de origen fúngico en la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar. XIII Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados de la Caña, DIVERSIFICACIÓN 2015 (2015).
36. Alternativas tecnológicas para reducir el volumen de las vinazas de la industria alcohólica y su tratamiento. XIII Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados de la Caña, DIVERSIFICACIÓN 2015 (2015).
37. Microalgas como materia prima para la producción de biocombustibles en Cuba. CIER 2015. La Habana (2015).
38. Célula de conocimientos en el uso de biocombustibles derivados de fuentes no comestibles y desechos. CIER 2015. La Habana (2015).
39. Simulación del proceso de destilación artesanal de cocuy pecayero". IX Congreso Internacional de Química, Ingeniería Química y Bioquímica (QUIMICUBA'2015), La Habana, Cuba (2015).
40. Técnicas de deshidratación de etanol. IX Congreso Internacional de Química, Ingeniería Química y Bioquímica QUIMICUBA'2015 (2015).
41. Base de conocimientos para el análisis energético de destilerías de etanol hidratado con un sistema experto. IX Congreso Internacional de Química, Ingeniería Química y Bioquímica QUIMICUBA'2015 (2015).
42. Disminución del volumen de vinazas en destilerías de etanol hidratado. Variantes tecnológicas". IX Congreso Internacional de Química, Ingeniería Química y Bioquímica (QUIMICUBA'2015), La Habana, Cuba (2015).
43. Validación de algoritmos para procesos de fermentación alcohólica". IX Congreso Internacional de Química, Ingeniería Química y Bioquímica QUIMICUBA'2015 (2015).
44. By-products from the vegetable oil industry as a feasible source for biofuels production and pollution reduction. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba, España (2014).

45. Performance of a single cylinder diesel engine fuelled with emulsified residual oleins and standard diesel fuel. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba, España (2014).
46. Impacto medio ambiental del aceite de *Jatropha curcas* utilizado como biocombustible". VIII Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medio Ambiente. SUIMA, XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana, Cuba (2014).
47. Evaluación de ciclos de potencias para la producción de electricidad a partir de una mezcla etanol-agua utilizando la simulación. III Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA) en XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA), CUJAE, La Habana, Cuba (2014).
48. Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. III Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA) en XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA), CUJAE, La Habana, Cuba (2014).
49. Deshidratación de etanol empleando líquidos iónicos. III Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA) en XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA), CUJAE, La Habana, Cuba (2014).
50. Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol aplicando la simulación. III Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA) en XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA), CUJAE, La Habana, Cuba (2014).
51. Efecto del pretratamiento básico aplicado a los residuos del proceso productivo de VIMANG en Cuba. VII Simposio internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos Villahermosa, Tabasco, México. (2014).
52. Pretratamiento básico con hidróxido de sodio aplicado a residuales del proceso productivo de Vimang. III Congreso Internacional de Ingeniería Química, Biotecnológica y Alimentaria (CIIQBA) en XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA), CUJAE, La Habana, Cuba (2014).
53. Surface tension prediction of vegetable oils using artificial neural networks and multiple linear regression. Solar World Congress 2013, Cancun, México (2013).
54. Prediction of cetane number and ignition delay of biodiesel using Artificial Neural Networks. Solar World Congress 2013, Cancun, México (2013).
55. Prediction of cetane number of biodiesel from its fatty acid ester composition using Artificial Neural Networks. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13), Bilbao, España (2013).
56. Engine performance of a single cylinder direct injection diesel engine fuelled with blends of *Jatropha Curcas* oil and standard diesel fuel. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13), Bilbao, España (2013).
57. Engine performance of a single cylinder DI diesel engine fuelled with blends of *Jatropha curcas* oil and standard diesel fuel. World Wind Energy Conference. Habana (2013).
58. Assessment of the use of fatty acid distillates for energy production in diesel engines. World Wind Energy Conference. Habana (2013).

59. Prediction of the cetane number of biodiesel from its fatty acid ester composition using artificial neural networks. World Wind Energy Conference. Habana (2013).
60. Performance of a single cylinder diesel engine using water-in diesel emulsions stabilized. World Wind Energy Conference. Habana (2013).
61. The residual oleins as alternative fuel for diesel Engine. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013)
62. Microemulsions as alternative to transesterification reaction. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013)
63. Characterization of *Jatropha curcas* from different feedstocks. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013)
64. Failures of fuel injectors in a medium speed engine running with biofuel. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013)
65. Use of neural networks for prediction of cetane number of biodiesel. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013).
66. Investigación experimental de las prestaciones de un motor monocilindrico usando combustible emulsionado. IX Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, I Coloquio: "Transporte y Medio Ambiente" Habana (2013).
67. Emergetic analysis of Cuban biofuels from some feedstock. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013).
68. Installation and Characterization of the engine test bench at CETER. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013).
69. Use of residual oleins in a diesel engine. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013).
70. Comparative analysis of experimental bench tests using different Cuban biofuels. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013).
71. n-hexane based chemical extraction of vegetable oil from *Moringa Olifera* Lann supergenius variety. Workshop Biofuels produced in Cuba and their use in Internal Combustion Engines. Habana (2013).
72. Density and viscosity analysis of *Jatropha* oil blends in diesel fuel. World Wind Energy Conference. Habana (2013).

Proyectos de investigaciones y fuentes de financiamiento

La actualidad y pertinencia de las investigaciones en el desarrollo de biocombustibles de segunda y tercera generación está evidenciada en la participación directa en cinco proyectos internacionales, los cuales han permitido ayudar a financiar las investigaciones y fomentar el intercambio académico. Los cinco proyectos desarrollados son:

- Sistemas emulsionados para biocombustibles. Evaluación de su uso en Motores de Combustión Interna. Proyecto VLIR con Universidad de Gante, Bélgica (2014-2016). Participan: Ramón Piloto, Pedro Rodríguez y Eliezer Ahmed Melo.
- Estudio de autoencendido de biodiesel derivado de cultivos de microalgas para mejorar la independencia energética de Latinoamérica. Proyecto con la Universidad de Castilla la Mancha, España (2015). Participan: Yisel Sánchez, Ramón Piloto y Yosvany Díaz.
- Clean Energy-Cuba. Proyecto Internacional con participantes de un número importante de instituciones cubanas coordinado por la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey. Participan: Ramón Piloto, Eliezer Ahmed Melo y Yisel Sánchez.
- Desarrollo de fotobiorreactores continuos para el cultivo de microalgas para la producción de biodiesel: fisiología, aplicaciones y viabilidad económica. Proyecto FAPESP (2013-2015). Participa: Pedro Rodríguez.
- Célula de conocimientos en el empleo de biocombustibles producidos a partir de residuales industriales y desechos para su uso en MCI. Proyecto VLIR con Universidad de Gante, Bélgica (2013-2010). Participan: Ramón Piloto, Pedro Rodríguez, Eliezer Ahmed Melo, Yisel Sánchez, Yosvany Díaz, Leonardo Goyos.

Por esta vía se ha podido captar un total de 325.000€ que han sido de beneficio directo para la CUJAE en el desarrollo de instalaciones experimentales, estancias de investigación en instituciones foráneas y pago de la participación en congresos internacionales, así como el apoyo a otros proyectos nacionales e internacionales externos que se involucran con nuestra institución dado el potencial del uso de las instalaciones logradas.

Resultado Científico-Técnico (Comunicación corta)

Emulsificación como alternativa para la producción de combustibles alternativos y aumento de la eficiencia energética durante la combustión

Esta parte del trabajo ha generado alternativas energéticas que evitan la transesterificación de residuales de la refinación de aceites vegetales y que permite obtener un combustible alternativo con niveles de viscosidad muy cercano a las exigencias de las normas internacionales. Mediante este trabajo se viene desarrollando un proyecto internacional y una tesis doctoral, quedando claro que es una alternativa para la solución de problemas ambientales y para mejorar eficiencia energética en el transporte automotor [12, 18]. Se ha derivado en una patente que responde a la formulación de una emulsión combustible a partir de destilados de ácidos grasos, que ya ha sido evaluada en un motor diesel. Los estudios en este campo son novedosos y continúan desarrollándose en diversas latitudes [19-23] y en nuestro caso continuamos avanzando en la obtención de formulaciones con gran potencial para su uso como combustibles alternativos en motores diesel [16].

Se han obtenido relevantes resultados en la evaluación de la microexplosión y en la aplicación de técnicas novedosas en la formulación y caracterización de emulsiones combustibles, avalados por su publicación en revistas de alto impacto y en congresos de prestigio en la temática. En los resultados más importantes incluidos en la propuesta hay cuatro artículos publicados en la web de las ciencias, dos en Scopus y otros dos en revistas indexadas. Estos resultados han permitido emplear formulaciones de emulsiones que disminuyen el impacto nocivo de algunos gases emitidos por el motor y un mejor aprovechamiento de la energía procedente del proceso de combustión en el motor.

Evaluación de impacto medioambiental del aceite de *Jatropha curcas* utilizado como biocombustible

También como parte importante de este trabajo conjunto de investigación se obtuvieron resultados de análisis de factibilidad y ciclos de vida de la *Jatropha curcas* como combustible alternativo de segunda generación para motores diesel. Los resultados muestran la factibilidad y algunas de las ventajas del uso de la *Jatropha curcas* tanto para producir aceite vegetal como biodiesel. Los resultados fueron publicados en una revista de la web de las ciencias y un capítulo de libro.

La aplicación del procedimiento de cálculo de la matriz de ponderación del impacto medioambiental del uso de esta planta como productora de biocombustibles, permitió determinar la magnitud ponderada del impacto de cada actividad del ciclo de vida. El impacto medioambiental ponderado de la producción de aceite de *Jatropha curcas* para la producción de combustibles alternativos es de 7,26%, que clasifica como

impacto pequeño y permite afirmar que es una biomasa compatible con el medio ambiente. A estos resultados se llegó a partir de nuestras investigaciones [10, 17]. Una parte importante de estos resultados ya han sido publicados. Esta propuesta incluye específicamente para esta línea de investigaciones un artículo en la web de las ciencias y un capítulo de libro.

Conversión de subproductos de la industria de refinación de aceites vegetales en biodiesel y otros derivados

A partir del análisis de los subproductos que genera la industria de refinación de aceites vegetales hemos podido hacer una caracterización completa de los mismos y a partir de estos obtener diferentes variantes como combustibles para motores diesel: mezclas carburantes, biodiesel y emulsiones [14, 17, 18]. Los resultados fundamentales están distribuidos entre un artículo publicado en la web, dos publicados en otras bases de datos, una patente, así como otro artículo en proceso en la web de las ciencias, un capítulo de libro y una tesis de maestría defendida. De estos subproductos se ha logrado la obtención de biodiesel o una emulsión combustible, los cuales han sido evaluados en su totalidad en motores diesel y se ha realizado una caracterización fisicoquímica tanto del residual como del biodiesel obtenido. Actualmente esta parte del trabajo se encuentra en la fase de análisis de ciclo de vida.

Obtención de modelos matemáticos para la determinación de propiedades y parámetros de los combustibles alternativos

Como complemento del trabajo y paralelo a la obtención y evaluación del comportamiento de los combustibles alternativos estudiados, se realizó una modelación matemática de parámetros y propiedades importantes que influyen en el desempeño del motor cuando utiliza combustible alternativo. Se obtuvieron y publicaron modelos para predecir el número de cetano y la tensión superficial a partir de la composición de ácidos grasos del combustible alternativo [13, 15]. Estos modelos aportan a la temática de investigación pues pueden ser usados para predecir estos parámetros bajo determinadas condiciones de trabajo y tipos de combustibles y pueden ser utilizados como herramientas en la modelación posterior de fenómenos que involucren este tipo de combustibles alternativos, reduciendo considerablemente el tiempo y los costos asociados a investigaciones en la temática.

La publicación de los resultados relativos a esta parte de la investigación se resume en un artículo en la web de las ciencias, dos en Scopus y dos en SCielo, los cuales si son analizados en su conjunto, representan la continuidad de un trabajo enfocado a la obtención de un paquete de modelos matemáticos que permitan predecir propiedades físicas muy importantes de combustibles alternativos para motores diesel, a partir de su composición química. La ventaja fundamental de los modelos desarrollados radica en

que la estimación de dichas propiedades y parámetros evita la costosa experimentación en bancos especiales de motores de combustión interna en el caso del número de cetano o el uso de equipos de medición de tensión superficial, lo cual hace de la modelación, un método menos costoso y mucho más rápido, validado experimentalmente. Hoy se cuenta con herramientas para evaluar tensión superficial, viscosidad, número de cetano y retardo de la ignición de biocombustibles para motores diesel, lo cual permite ahorrar mucho tiempo en la evaluación de los mismos y cuantiosos recursos financieros en instalaciones investigativas.

Inyección de combustibles alternativos en la cámara de combustión

Se realizó un estudio de los procesos de inyección en la cámara de combustión de biodiesel y aceites vegetales en una Cámara de Combustión a Volumen Constante, lo cual es de vital importancia para entender e incidir en todos los complejos fenómenos que ocurren en la cámara de combustión una vez que el combustible diesel estándar es sustituido parcial o totalmente para la producción de energía en un motor diesel. Los detalles de lo publicado en esta parte de la investigación se puede consultar en [24]. Este es uno de los elementos más importantes en cualquier estudio integral de un biocombustible para su posterior uso en motores. Es por mucho la parte más costosa de la investigación correspondiente a esta propuesta de premio. Los resultados más importantes de esta parte del trabajo se encuentran en un artículo en la web de las ciencias y varios en proceso.

Microalgas como fuente de producción de combustibles alternativos

Las microalgas son el combustible alternativo de tercera generación por excelencia. Esta parte del trabajo es la de más reciente incorporación a las líneas de investigación nuestras pero es la que más futuro tiene en el mundo entero en materia de combustibles alternativos, al menos entre las existentes hoy, toda vez que múltiples variantes de combustibles alternativos pueden ser obtenidos a partir de microalgas, incluyendo el hidrógeno, además de ser la variante de producción de biomasa de mayor rendimiento en el planeta [9, 25-29]. Los resultados han llegado ya hasta la producción de biomasa y se desarrollan cultivos de microalgas bajo diferentes condiciones experimentales y en diferentes medios de cultivo y nutrientes. Los principales resultados de esta parte de la investigación se encuentran en dos artículos publicados en la web de las ciencias y uno en proceso, así como el desarrollo actual de una tesis doctoral y un proyecto internacional en la temática.

Obtención de etanol a partir de residuales industriales

Se desarrolla como parte del trabajo para la obtención y uso de etanol como biocombustible de segunda generación, un procedimiento de cálculo aplicado para realizar el balance de energía en la producción de etanol a partir de la hidrólisis del

bagazo. Se calcula la pérdida de potencialidades de generación de energía eléctrica que ocasiona utilizar el bagazo para producir etanol en lugar de usarlo para generar etanol lignocelulósico, la cual está comprendida entre 45-64%. Se analiza la relación que existe entre el volumen de etanol producido y los rendimientos de los ciclos partir de etanol y de bagazo, respectivamente. Si se utiliza la lignina contenida en el bagazo y se produce biogás a partir de las vinazas de destilería esta pérdida de potencialidades energéticas se reduce 35%.

Los resultados de esta parte del trabajo están avalados fundamentalmente en la defensa de una tesis doctoral, así como la publicación de dos artículos en la web de las ciencias, uno en Scopus y 7 artículos en revistas indexadas con revisión por pares.

Biodiesel a partir de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas*

En esta parte de la investigación se han obtenido resultados que abarcan varias etapas hasta la producción de biodiesel de *Moringa oleífera*. Desde la preparación de la semilla para la extracción del aceite, el estudio de los tiempos de extracción y el rendimiento del proceso, caracterización físico-química del aceite extraído y su conversión a biodiesel por diferentes vías. Los detalles de esta parte de la investigación aparecen más adelante y han sido publicados en una revista de la web de las ciencias y varios artículos de grupo 2, así como otros dos artículos en proceso en la web de las ciencias.

La obtención del biodiesel a partir de *Jatropha curcas* es un tema que se ha desarrollado previamente a esta propuesta de premio, con importantes resultados [30, 31] y contribución al programa nacional de desarrollo de este biocombustible y a los proyectos internacionales que hoy se desarrollan en Cuba al respecto. En esta propuesta de premio, el trabajo se ha centrado en la evaluación de impactos, ciclos de vida y en breve comienza una campana de pruebas en bancos de motores diesel con el biodiesel de *Jatropha curcas* que actualmente está produciendo el proyecto internacional *Biomass Cuba* del cual somos participantes. En esta propuesta se encuentran en el caso específico de esta línea dos artículos publicados en la web de las ciencias y tres en revistas indexadas con revisión por pares.

Descripción Científico-Técnica detallada del Resultado Científico

Emulsificación como alternativa para la producción de combustibles alternativos y mejora de la eficiencia energética durante la combustión

Esta parte del trabajo se basa en la formulación de emulsiones combustibles con el objetivo de evitar realizar la transesterificación de la materia prima para obtener biodiesel y mediante una formulación de múltiples compuestos disminuir la viscosidad hasta valores cercanos al combustible diesel. A partir de ello se ha propuesto una patente del proceso de formulación de una emulsión: Procedimiento para la obtención de combustibles emulsionados a partir de destilados de ácidos grasos. Solicitud Oficial No. 2015-0069. R. Piloto, Y. Díaz, E. Melo, otorgada en 2017 (CU2015000069).

En esta invención, se propone la estabilización de una emulsión que involucra como fase continua a un residual industrial compuesto por destilados de ácidos grasos (DAG) y triglicéridos para producir un combustible alternativo. Este procede de la industria de refinación de aceite vegetal para el consumo humano. Como resultado del proceso de refinación del aceite crudo, tanto por la vía química como por la física, se obtienen tres residuales industriales de bajo valor comercial. Estos residuales se conocen como jaboncillo, aceite ácido y destilados de ácidos grasos. Estos últimos son los propuestos en esta invención para obtener una emulsión combustible estable y así dar un uso útil a este residual para la producción de energía.

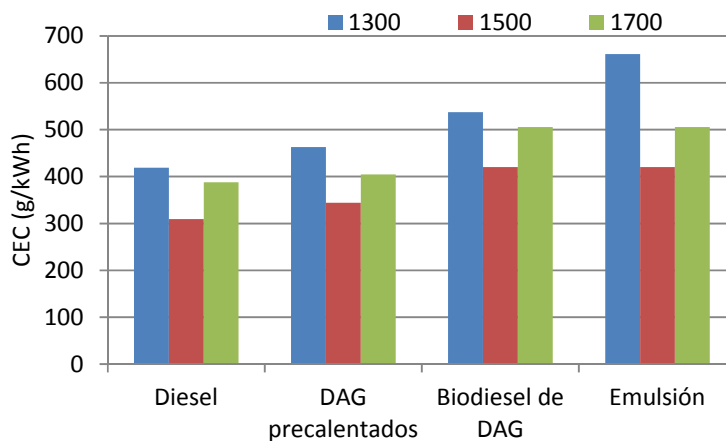


Fig.2 Consumo específico de combustible (CEC) al utilizar la emulsión propuesta

Además, hemos evaluado diferentes emulsiones en motores diesel con resultados satisfactorios. A pesar del incremento observado del consumo específico de combustible (Fig.2) fundamentalmente con respecto al combustible de referencia, se evidencia una reducción apreciable de las emisiones de NO_x y al evitar realizar la esterificación y transesterificación del residual industrial, el ahorro de energía y

recursos con esta propuesta para la producción del biocombustible es considerable. Los resultados de emisiones de NOx se muestran en la Fig.3, comparados con el combustible diesel y otras dos alternativas.

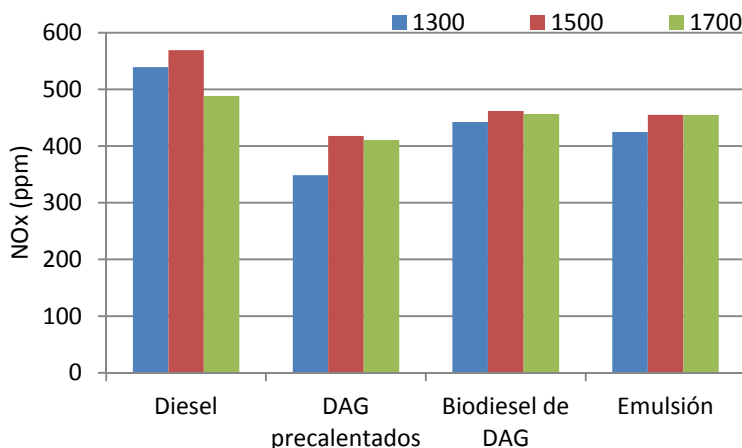


Fig.3 Emisiones de NOx en un motor diesel al utilizar la emulsión propuesta

La investigación en este campo específico continúa focalizada en la formulación de emulsiones estables y en la evaluación y modelación de las características de la atomización del combustible al penetrar en la cámara de combustión, acorde al fenómeno conocido como microexplosión. Parte de los resultados obtenidos en esta parte de la propuesta pueden ser consultadas en [12, 16, 18]. Se ha estado investigando con varias formulaciones que involucran cambios en fase dispersa, fase continua, contenido de agua, contenido de alcoholes y cantidad de tensoactivo empleada. Los experimentos han llegado desde las formulaciones hasta la fase de prueba en motores y evaluación de prestaciones y emisiones, como se puede constatar en la patente y los artículos publicados o en proceso.

No obstante, los resultados más trascendentales en línea en particular son los relativos a la evaluación de ocurrencia de la microexplosión en diferentes condiciones para varias formulaciones de emulsiones combustibles. Se pueden encontrar muchos trabajos publicados hablando de este fenómeno, pero la realidad es que el mismo ocurre solo bajo determinadas condiciones y en el ejerce gran influencia la viscosidad, contenido de agua y recientemente hemos constatado que influye significativamente la cantidad de agente tensoactivo. En la Fig.4 se muestra una secuencia real analizada por los autores de este trabajo en una cámara de análisis de gota única. La instalación experimental desarrollada por los autores para la observación de dichos fenómenos se muestra en la Fig.5. Los detalles al respecto se encuentran en proceso de arbitraje en sendos artículos enviados a la revista Fuel (una de las más prestigiosas en la temática en el mundo).

Adicionalmente, se ha estado desarrollando un método de emulsificación basado en micro-canales que permite formar una emulsión combustible sin el uso de un tensoactivo para su formulación lo cual potencialmente reduce considerablemente los costos asociados a esta tecnología y potencialmente constituiría un resultado de alto impacto en la formulación de emulsiones combustibles. Los resultados obtenidos también forman parte de los manuscritos en arbitraje en la revista Fuel (ver anexos).

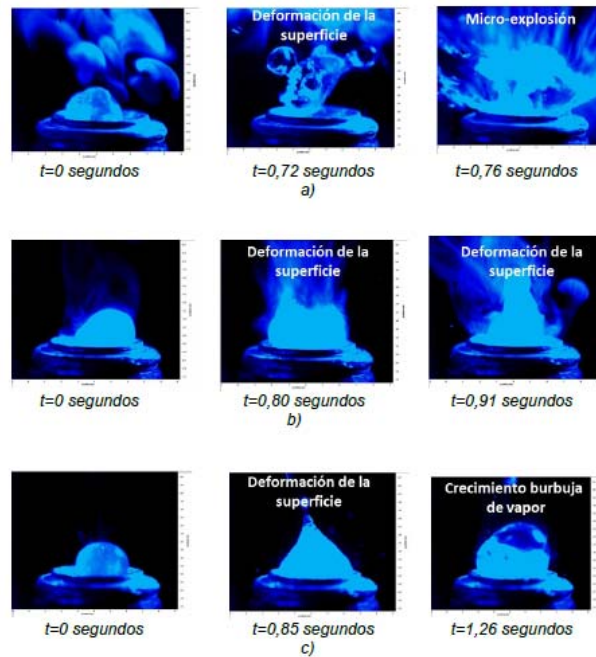


Fig.4 Ocurrancia de los fenómenos de deformación de la superficie y microexplosión para diferentes formulaciones de emulsiones combustibles

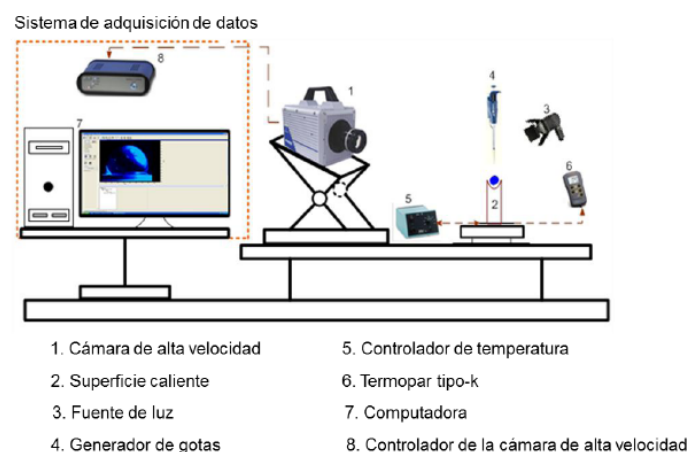


Fig.5 Diagrama esquemático de la configuración experimental utilizada para el análisis de la ocurrencia de la deformación de la superficie y microexplosión

Microalgas como fuente de producción de combustibles alternativos

Un acercamiento a la obtención de biocombustibles de tercera generación ya ha sido realizado por el grupo de investigaciones. Para ello se tienen la meta no solo de cultivar las microalgas más comúnmente encontradas en la naturaleza cubana sino también lograr producir la biomasa algal en cantidades suficientes para que sea posible disponer del combustible alternativo necesario para ser llevado a un motor de combustión interna y evaluar su desempeño y el proceso de combustión. Hasta el momento se ha estado trabajando en la obtención y caracterización con algunos resultados. También resulta importante desarrollar diseños propios de fotobiorreactores, así como su construcción con vistas a desarrollar combustibles alternativos a partir de microalgas con disminución apreciable de los costos de producción e incremento de los rendimientos.

Los resultados hasta este momento van desde la obtención y caracterización de biodiesel a partir de *Chlorella vulgaris* (Fig.6), el estudio de los sistemas más comúnmente empleados para el cultivo a mayor escala de biomasa microalgal, hasta el desarrollo de cultivos a partir de diferentes condiciones experimentales y medios de cultivo que permitan producir biomasa de manera eficiente y ajustada a las condiciones cubanas y a los recursos disponibles. Los detalles de esta parte de la investigación pueden ser consultados en (Obtención de biomasa de microalga *Chlorella vulgaris* en un banco de prueba de fotobiorreactores de columna de burbujeo. P. Rodríguez, Y. Sánchez, L. Zumalacárregui, O. Pérez. *Afinidad. Revista de Química Teórica y Aplicada* (2015).

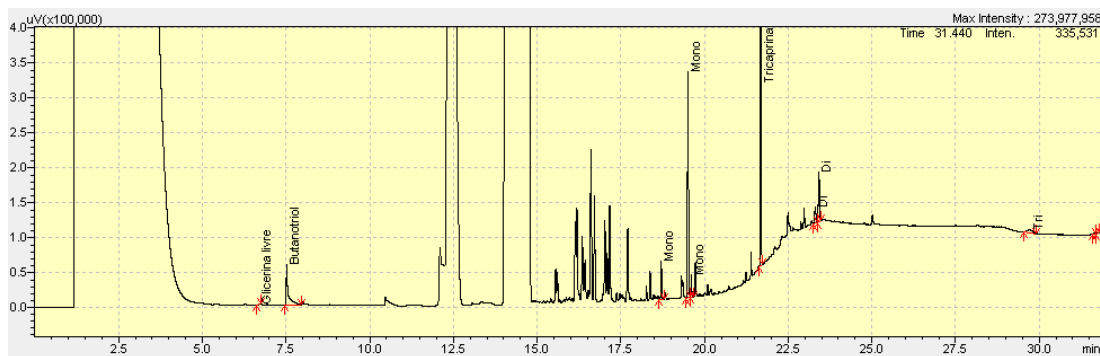


Fig.6 Biodiesel proveniente de *Chlorella vulgaris* evaluado mediante cromatografía de gases

Evaluación del impacto medioambiental del aceite de *Jatropha curcas* utilizado como biocombustible

En el caso de la *Jatropha curcas*, se realizó el análisis de sustentabilidad del impacto de la producción del aceite de *Jatropha* como combustible, evaluando su ciclo de vida. El impacto medioambiental se determinó a través de la matriz de ponderación del impacto medio ambiental (base 19-19-19-4). Es decir, mostrando el impacto de las 19 actividades del ciclo de vida del aceite de la *Jatropha curcas* en las 19 categorías de impacto de nivel medio y en las 4 de nivel final. Esta valoración demostró que el aceite de *Jatropha curcas* es adecuado para el medioambiente. Se constató que la *Jatropha curcas* es una biomasa excelente, que puede ser incorporada en la matriz energética de Cuba, para el beneficio, en primera instancia, de granjeros organizados en pequeñas comunidades de producción. La evaluación completa del impacto de la *Jatropha curcas* para la producción de biocombustibles se muestra resumidamente en la Fig.7. Los detalles de esta parte de la investigación se pueden consultar en [10, 17]. Este estudio de ciclo de vida es vital para fundamentar una propuesta y será extensible a toda propuesta que aflore como resultado de las investigaciones.

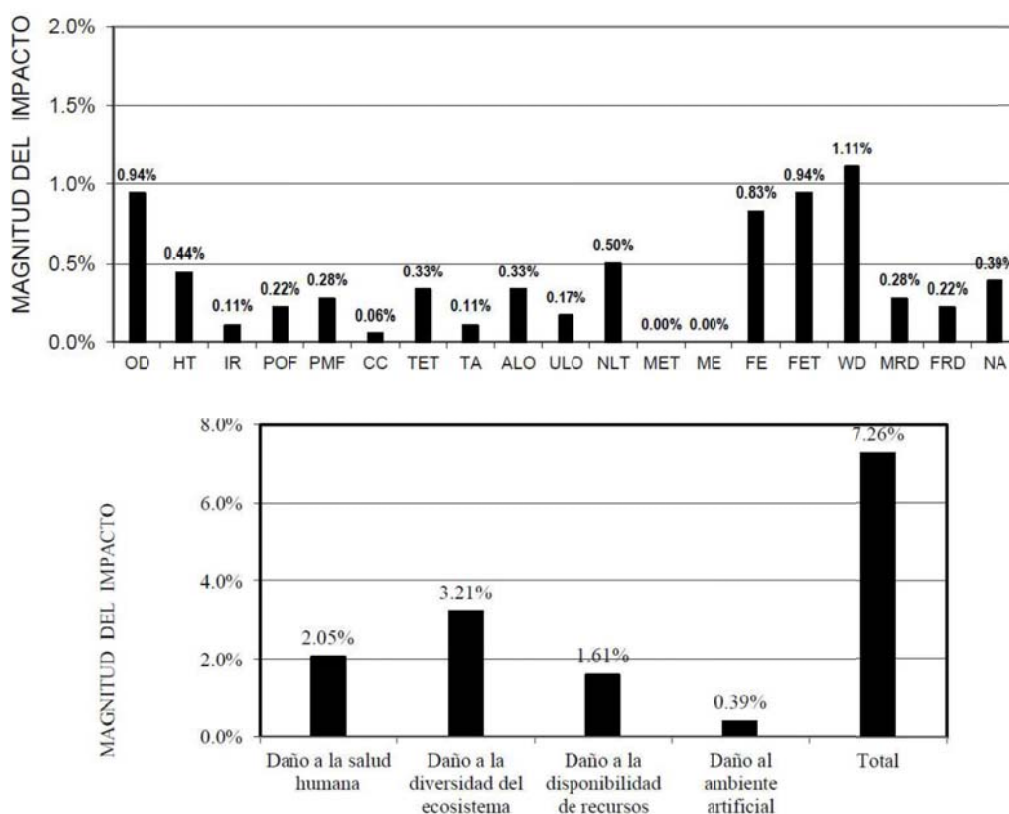


Fig.7 Diagrama resumen del análisis de ciclo de vida aplicado a la *Jatropha curcas*

Conversión de subproductos de la industria de refinación de aceites vegetales en biodiesel y otros biocombustibles

Varios son los subproductos derivados de la industria de refinación de aceites vegetales para el consumo humano [14]. Estos trabajos han estado enfocados hacia el uso de los destilados de ácidos grasos para su uso en diferentes variantes para producir energía en un MCI.

La obtención de biodiesel a partir de un residual industrial como son los DAG es un proceso complejo, ya que implica una primera reacción de esterificación para reducir o más bien eliminar los ácidos grasos libres presentes en el residual industrial, para posteriormente convertir los triglicéridos presentes en el residual a biodiesel. Una vez convertidos ambos componentes fundamentales del residual (DAG y ácidos grasos libres) a biodiesel, un proceso de separación y purificación debe ser llevado a cabo antes que el biodiesel obtenido esté apto para su uso en un MCI. La eliminación previa de los AGL es debido a problemas de corrosión que pueden aparecer en partes del motor y que también compiten por el catalizador afectando el rendimiento de la reacción de transesterificación.

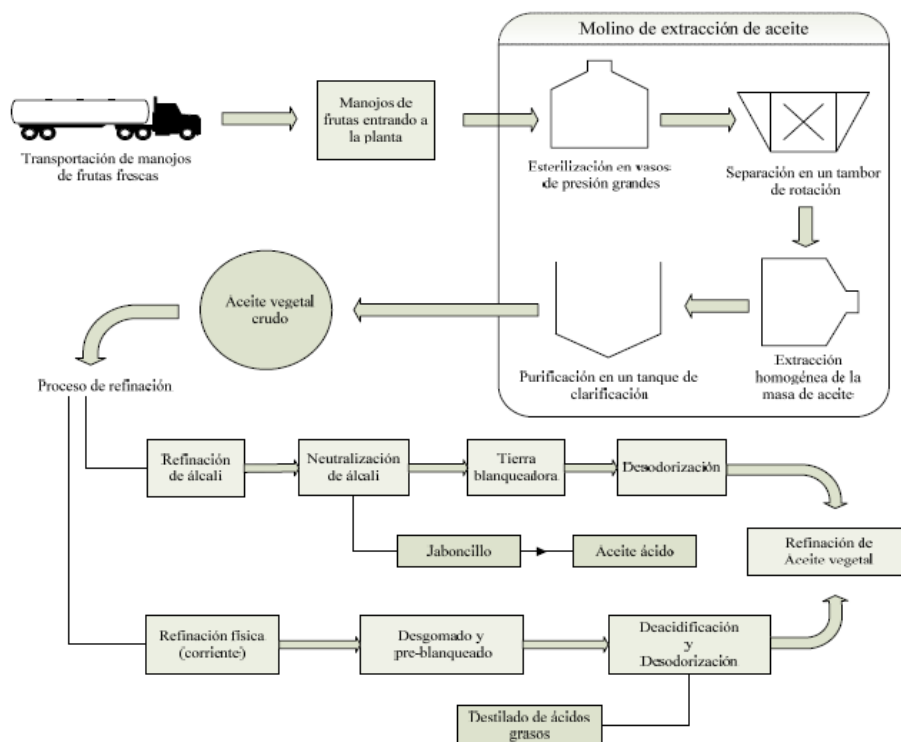


Fig.8 Diagrama completo de la refinación de aceites vegetales de donde provienen los destilados de ácidos grasos

Las técnicas aplicadas para la conversión total del residual a biodiesel se basan en lo propuesto por [32] pero con modificaciones importantes pues las propiedades físicas y sobre todo químicas del residual que los autores emplearon no son exactamente las del residual industrial tratado en este trabajo. De hecho, como parte de esta propuesta se realizó un análisis de influencia de variables o condiciones de reacción para ambas reacciones químicas con vistas a obtener el mayor rendimiento de biodiesel posible sin descuidar la obtención de un producto final con valores de viscosidad en el rango exigido por las normas internacionales para la producción de biodiesel para su uso en un motor diesel. En la Fig.9 se muestra un de los estudios realizados mediante diseños factoriales para analizar la influencia de condiciones de reacción en la viscosidad del biodiesel obtenido.

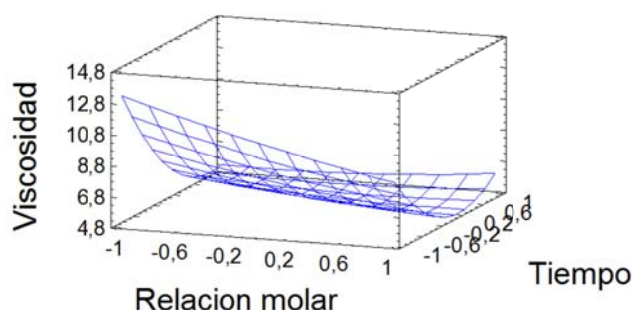


Fig.9 Influencia de condiciones de reacción en la viscosidad del biodiesel obtenido a partir de destilados de ácidos grasos

Uno de los resultados más importantes de esta parte del trabajo fue la caracterización físico química completa de los destilados de ácidos grasos procedentes de la industria cubana de refinación de aceite vegetal.

La Fig.10 muestra el perfil de ácidos grasos de los destilados obtenidos mediante cromatografía de gases, mediante el cual entre otros aspectos es posible estimar el número de cetano del biocombustible obtenido, lo cual es un parámetro muy importante para caracterizar el posterior proceso de combustión en un motor diesel. Entre los resultados más importantes y relevantes de esta parte de la propuesta podemos mencionar:

- Una caracterización amplia de un subproducto industrial altamente contaminante y con bajo valor comercial con vistas a su conversión en diferentes tipos de combustibles alternativos.
- La obtención de biodiesel a partir de destilados de ácidos grasos es un tema poco investigado y aún menos publicado.
- Variantes para la industria relacionada con el residual con vistas a la toma de decisiones para el manejo de este residual.

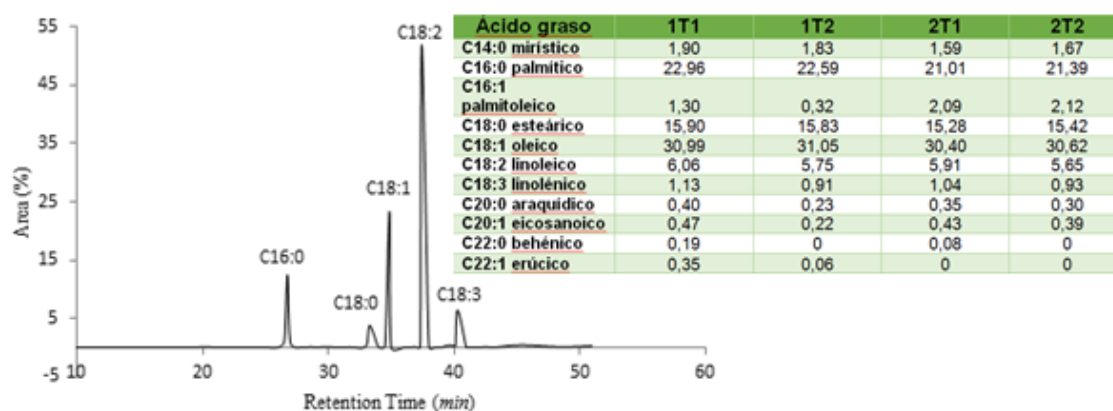


Fig.10 Composición de ácidos grasos de los destilados utilizados para producir biodiesel

Modelación matemática para la determinación de propiedades y parámetros de los combustibles alternativos

Como complemento del trabajo en cada una de las líneas específicas desarrolladas, se realizó una modelación matemática de parámetros y propiedades importantes que influyen en el desempeño del motor cuando utiliza combustibles alternativos. Se obtuvieron y publicaron modelos para predecir la tensión superficial, así como el número de cetano.

Estos modelos aportan a la temática de investigación, pues pueden ser usados para predecir estos parámetros bajo determinadas condiciones de trabajo y tipos de combustibles y pueden ser utilizados como herramientas en la modelación posterior de fenómenos que involucren este tipo de combustibles alternativos en MCI. Son de gran importancia ya que la determinación del número de cetano y la tensión superficial pasa por la adquisición de equipamiento sumamente costoso.

Para la modelación de la tensión superficial se utilizaron datos experimentales que permitieran modelar la influencia de nueve ácidos grasos comúnmente presentes en una gama amplia de aceites vegetales en la tensión superficial, propiedad muy importante cuando se estudian fenómenos superficiales y propiedades tensoactivas de sustancias o de mezclas, tomando en consideración que la formulación de emulsiones, microemulsiones o en general sistemas dispersos es parte de las líneas de investigación que desarrollamos actualmente y que conforman esta propuesta. La topología típica empleada en la modelación matemática de la tensión superficial se muestra en la Fig.11 y los detalles en cuanto al modelo matemático obtenido, entrenamiento de la red y validación de los resultados pueden ser consultados en [33].

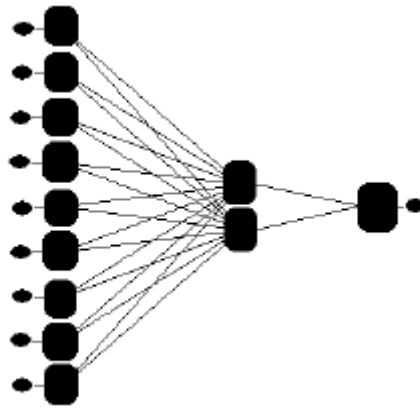


Fig.11 Topología (9:2:1) empleada para la modelación de la tensión superficial

En el caso de la modelación matemática para la predicción del número de cetano, esta fue desarrollada a partir de la implementación de Redes Neuronales Artificiales. Para ello se definió el tipo de redes a utilizar, los algoritmos de entrenamiento de la misma, número de capas y nodos por capa, margen de error y parámetros o función objetivo en el proceso de obtención del óptimo buscado. Fue así modelado el número de cetano del biodiesel a partir de un número de fuentes de procedencia que sobrepasa las 60 variantes de composición química de ácidos grasos del combustible en cuestión, lo que lo convierte en un modelo de alcance general y de amplio uso por parte de la comunidad científica. La topología general de una de las redes neuronales evaluadas así como el diagrama de superficie de respuesta para buscar el óptimo en el espacio factorial analizado y obtenidos mediante el software *Statistica 7* se muestran en la Fig.12.

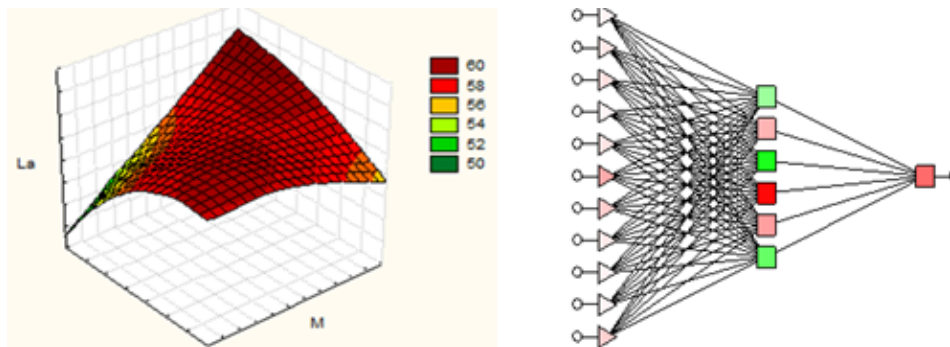


Fig.12 Red neuronal para predicción del número de cetano

A partir de un modelo para predecir el número de cetano a partir de la composición química en cuanto a ácidos grasos, es posible extender su utilización a la predicción de otros parámetros como el propio retardo de la ignición. Los detalles de las diferentes etapas de esta parte de la modelación matemática pueden ser consultadas en [13, 15].

Es válido puntualizar que la modelación matemática del número de cetano ha ido ampliándose sucesivamente desde que fue obtenido y publicado el primer resultado, ampliándose así el alcance, número de topologías de red analizadas y solo fue concluido con la defensa de una tesis de maestría, dando como resultado tres artículos publicados [13, 15, 34]. Para analizar el alcance del trabajo y que este forme parte de una propuesta de premio deben ser tomados en consideración todos los resultados en su conjunto donde se evidencia que se ha ampliado no solo el número de redes neuronales analizadas, sino que la modelación fue desarrollada también mediante regresión lineal múltiple que en su momento sirvió de comparación con los resultados de las redes y también fue extendida la modelación a la predicción del retardo de la ignición del combustible.

Debido a que el número de cetano es muy importante en el proceso de combustión de un combustible alternativo de este tipo, disponer de una relación que permite cuantificar el número de cetano a partir de la composición de ácidos grasos y que dicho modelo abarque 11 ácidos grasos, lo cual representa la inmensa mayoría de las situaciones prácticas al trabajar estos combustibles, representa una poderosa herramienta para diseñar el combustible apropiado para una aplicación o para su uso con un motor específico a partir del análisis detallado de su composición química. Ello unido a que se puede manipular mediante técnicas de Ingeniería Genética la composición del aceite o mediante formación de mezclas adecuadas con otras sustancias o combustibles en la búsqueda de un combustible con composición de ácidos grasos prefijada y por ende, con un número de cetano deseado.

Proceso de inyección en la cámara de combustión de biodiesel y aceites vegetales

La atomización del combustible en la cámara de combustión en el caso de un motor diesel, es extremadamente importante para la reducción del consumo de combustible y de la emisión de gases de escape. Un buen proceso de atomización, acorde al comportamiento del combustible diesel de referencia, lleva a un mejoramiento de la pre-mezcla aire-combustible llevando así a un mejor y más completo proceso de combustión que ocurre posteriormente. Por ello el estudio del proceso de atomización del combustible toma relevancia a partir de una mayor exigencia ambiental para los fabricantes y usuarios de la industria automotriz.

Esta parte de la investigación fue desarrollada en las instalaciones de la Universidad de Gante, Bélgica. Para ello se utilizaron entre otras fundamentalmente una cámara de combustión a volumen constante, con un volumen interno de 1603 mm^3 y acceso óptico en dos direcciones. Las investigaciones aunque fueron en primera instancia llevadas a cabo con combustibles alternativos de primera generación como la colza y la palma, también en la investigación y en los resultados publicados fue incluida uno de segunda

generación ya que grasas animales residuales de procesos de elaboración de alimentos fueron probadas en la cámara de combustión.

Una panorámica general de la cámara de combustión, la instalación experimental, sistema óptico, así como algunos de los chorros de combustibles observados son mostrados en la Fig.13. Todos los detalles de esta parte de la investigación pueden ser consultadas en [24].

Entre las conclusiones más importantes de esta parte del trabajo se encuentran: las propiedades de la atomización son muy dependientes de la temperatura, encontrándose que pequeños cambios en la temperatura generan una influencia significativa en el resto de los fenómenos analizados; a mayor densidad de los combustibles analizados, ocurre una mayor duración de la inyección de combustible; la longitud del cono de atomización está muy influenciada por la velocidad del motor, así como la densidad, con una influencia aún más significativa que la temperatura en la cámara de combustión; el ángulo del cono de atomización no es dependiente de la velocidad del motor; similares ángulos fueron determinados para los diferentes combustibles alternativos estudiados; incrementos de temperatura de 25 a 45 °C mejora significativamente la atomización atribuido a una disminución de la densidad del combustible.

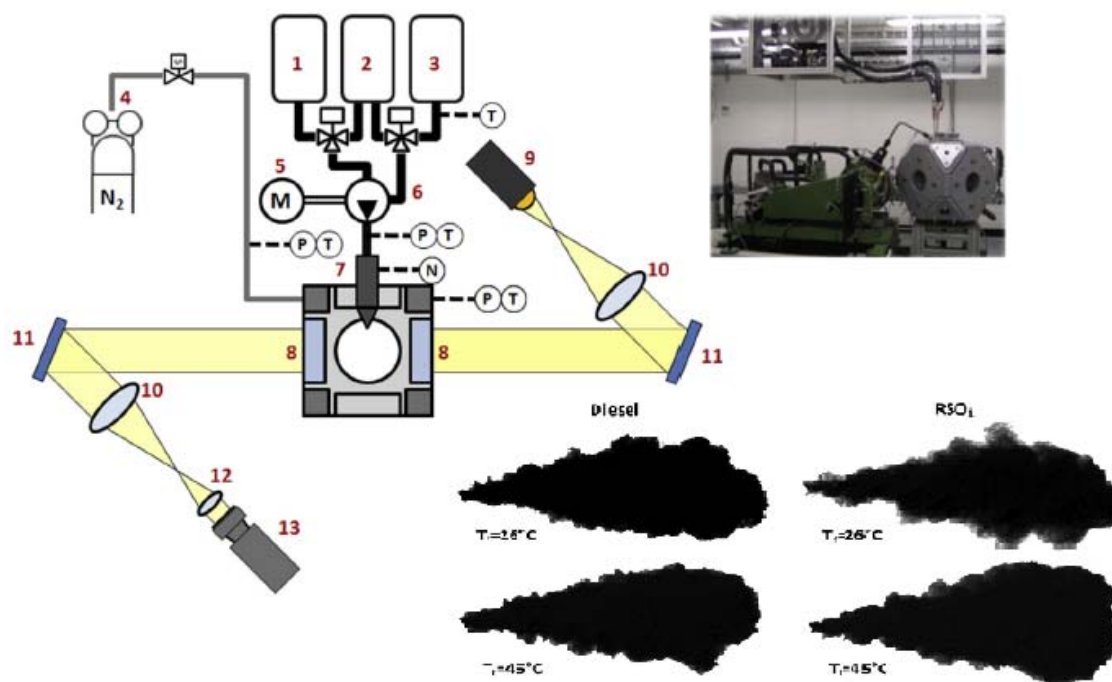


Fig.13 Esquema general de la cámara de combustión, instalación experimental, sistema óptico y chorros de combustibles observados experimentalmente

Uno de los autores de esta propuesta (Ramón Piloto) fue el encargado del trabajo químico previo a la introducción de los combustibles seleccionados en la cámara de combustión, tanto en lo que respecta a su tratamiento previo como al análisis de su composición química. Actualmente otro autor de esta propuesta (Ahmed Melo) se encuentra poniendo a punto la cámara de combustión y todo el sistema de mediciones para aplicar este mismo estudio a emulsiones que involucren biocombustibles de segunda generación.

La importancia de esta parte de los resultados radica en que al conocer cómo influyen determinadas condiciones o la composición del combustible alternativo en los parámetros del spray y por tanto en la combustión, es posible incidir en ello para lograr producir energía mediante la combustión de este tipo de combustibles alternativos de la manera más eficiente posible.

Obtención de etanol a partir de residuales industriales

Se desarrolla como parte del trabajo para la obtención y uso de etanol como biocombustible de segunda generación, un procedimiento de cálculo aplicado para realizar el balance de energía en la producción de etanol a partir de la hidrólisis del bagazo. Se calcula la pérdida de potencialidades de generación de energía eléctrica que ocasiona utilizar el bagazo para producir etanol en lugar de usarlo para generar etanol lignocelulósico, la cual está comprendida entre 45-64%. Se analiza la relación que existe entre el volumen de etanol producido y los rendimientos de los ciclos partir de etanol y de bagazo, respectivamente. Si se utiliza la lignina contenida en el bagazo y se produce biogás a partir de las vinazas de destilería esta pérdida de potencialidades energéticas se reduce 35%. Por otra parte, las emisiones de CO₂ disminuyen si se produce etanol a partir del bagazo, aun cuando se queme la lignina y el biogás para producir mayor cantidad de energía, de donde la alternativa de producción de etanol a partir del bagazo. Por consiguiente, la decisión de proceder a producir etanol o electricidad a partir de bagazo dependerá del contenido del bagazo que hasta hoy son bajas lo que no hace competitiva la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos en comparación con la producción de electricidad en algunos países. Esto podría constituir un resultado negativo pero es muy positivo para ayudar a los decisores de la energía en Cuba a trazar la estrategia de qué es lo más conveniente en función de las tecnologías empleadas, cantidades a producir y precios de venta. Se han obtenido resultados alternativos para la reducción del efecto ambiental de las vinazas en la industria alcoholera.

Por otra parte, otros residuos originados en las industrias agroalimentarias constituyen fuentes de energía renovable, los cuales pueden ser convertidos en subproductos para la producción de biocombustibles (tales como biogás y bioetanol), con cierto valor económico, a la vez que se reduce el impacto negativo al medio ambiente que

ocasionaría su incorrecta disposición. Uno de los sustratos estudiados fue el residual sólido del proceso de producción de VIMANG, un material lignocelulósico proveniente de la corteza de los árboles de *Mangífera indica*. Se realizó la caracterización física y química del material para evaluar su potencial para la obtención de etanol. Verificado esto, se propuso el esquema de pretratamiento combinado, el pretratamiento químico y la hidrólisis enzimática. Este resultado dio origen a una publicación en la revista Industrial Crops and Products y a la defensa de un doctorado en la Universidad Autónoma de Coahuila, en México.

Para el uso del etanol como combustible se requiere que este sea etanol deshidratado. Es por ello que se desarrollan trabajos encaminados a seleccionar las mejores condiciones para su deshidratación. Una vía menos estudiada en el proceso industrial es el uso de líquidos iónicos de naturaleza prótica, ya que estos son más baratos que los apróticos, la síntesis química es más simple, tienen bajo perfil toxicológico y presentan mejor biodegradabilidad. La experimentación realizada permitió su obtención, identificación y evaluación, obteniendo resultados prometedores en relación a la eficiencia de separación de los líquidos iónicos formiato y propionato de 2-hidroxietilamonio. En esta dirección se desarrolla un trabajo de doctorado.

Obtención de biodiesel a partir de *Moringa oleífera*

En los últimos tiempos se hace referencia a las potencialidades del aceite de *Moringa oleífera* para producir biodiesel [8, 35]. El perfil de ácidos grasos del aceite de *Moringa oleífera* es diferente al de otros aceites vegetales comúnmente empleados como materia prima en la producción del portador energético. El ácido graso que predomina en este aceite es el oleico (porcentajes entre 65 y 76%). Debido a ello, podría pensarse que no es sensato el uso de este aceite para la producción de biocombustible, sino utilizar el aceite vegetal con fines alimenticios, pero la presencia característica en la *Moringa* del ácido graso behénico, el cual puede encontrarse hasta en un 7% [36], determina que su uso con estos fines no sea científicamente recomendado. Es de notar que los aceites con un alto contenido de ácido oleico permiten obtener biodiesel con un balance razonable de las propiedades combustibles, aun cuando otros ácidos grasos pueden ser más ventajosos respecto a propiedades combustibles específicas por ejemplo las propiedades de flujo en frío. Por estas razones se ha abierto hace un tiempo la línea de desarrollo de biodiesel a partir de la *Moringa oleífera*.

Entre los principales resultados se encuentran la determinación del perfil de ácidos grasos de este aceite en su variedad criolla, lo cual es de vital importancia para el país por ser una variedad autóctona. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1. También se evaluó la factibilidad a escala de laboratorio de la producción de biodiesel a partir de dicho aceite. Los resultados obtenidos mostraron la potencialidad para ser utilizado como materia prima en la producción de biodiesel según los valores de

rendimiento obtenidos. Los ésteres metílicos que se obtienen tienen propiedades que se encuentran en correspondencia con los estándares internacionales de biodiesel (EN-14214 y ASTM D-6751). Los detalles de los resultados obtenidos, así como de la determinación de las condiciones que en el espacio factorial analizado ofrecen mejores rendimientos y menor viscosidad para el biocombustible obtenido se pueden consultar en [37]

Las muestras de biodiesel obtenidas se caracterizaron de acuerdo a densidad, viscosidad y grado de acidez. Los valores de estas propiedades fueron comparados con los estándares internacionales de biodiesel. Luego de la comparación de estas propiedades se pudo asegurar que el biodiesel de Moringa *oleífera* variedad criolla cumple con lo establecido en los estándares de biodiesel. Es válido destacar que tanto la densidad como la viscosidad son dos propiedades vitales a tener en cuenta en la futura aplicación del biocombustible en un motor de combustión interna.

Tabla 1. Composición de ácidos grasos en el aceite de Moringa *oleífera* variedad Criolla

Ácidos grasos	Variedad Criolla
C16:0 (palmítico)	6,114
C16:1 (palmitoléico)	1,559
C17:0 (margárico)	0,132
C18:0 (esteárico)	3,867
C18:1c (oleico)	75,839
C18:2 n-6 (linoleico)	0,672
C18:2 n-3 (linoleico)	0,044
C18:3n-3 (linolénico)	0,157
C20:0 (araquídico)	2,443
C20:1 (gondoico)	2,302
C20:2	0,268
C22:0 (behénico)	5,286
C:22:1 (Erúcico)	0,033
C22:5	0,069
C24:0 (lignocérico)	0,983
C24:1(Nervónico)	0,097

A partir de la caracterización fisicoquímica del aceite (específicamente la acidez) se logró determinar si se debe realizar un tratamiento previo a la síntesis. Este tratamiento no es más que la esterificación de los ácidos grasos libres y se aplica cuando su porcentaje en el aceite es superior al 3% (como ácido oleico). Vale destacar que esto

no ha ocurrido siempre, existiendo ocasiones en que se ha necesitado esterificar y otras no. La síntesis propiamente (reacción de transesterificación) se ha llevado a cabo mediante dos métodos. Primeramente la catálisis básica homogénea y en segunda instancia la catálisis básica homogénea asistida por ultrasonido. Para el primer método se cuenta con la evaluación de parámetros de operación. Se ha logrado caracterizar el biodiesel en cuanto a propiedades como densidad, viscosidad, acidez, número de cetano y reología. Para la síntesis asistida por ultrasonido ya se cuenta con un estudio preliminar del proceso que ha mostrado resultados satisfactorios y superiores a la catálisis básica homogénea (entiéndase menores tiempos de reacción y menos consumo de energía).

Por último, se realizó un estudio profundo del comportamiento reológico del biodiesel obtenido y del aceite. A partir de las curvas de fluidez y viscosidad se corrobora que para las condiciones del estudio el aceite de *Moringa oleífera* tiene un comportamiento de un fluido newtoniano. Sin embargo el biodiesel se comporta como un fluido no newtoniano (dilatante).

La importancia de estos resultados radica en una caracterización lo más completa posible del aceite de Moringa en su variedad criolla así como del biodiesel que de ella se deriva como paso imprescindible y previo a una producción y uso a otra escala. El próximo paso en las investigaciones será en la evaluación del biodiesel en bancos de motores diesel.

Introducción de los resultados y de su impacto

La presente propuesta comprende un amplio conjunto de resultados con diferentes alcances y estados de desarrollo de las investigaciones. Por ello un análisis de introducción e impacto debe ser para cada tipo de resultado.

En cuanto a la emulsificación como alternativa para la producción de combustibles alternativos y mejora de la eficiencia energética durante la combustión, es una línea que ha sido ampliamente desarrollada de manera integral y hasta escala de pruebas de bancos de motores abarcando desde las formulaciones, que son el elemento más crítico en estos tipos de combustibles hasta la evaluación de la atomización del combustible y el fenómeno de microexplosión. Todos los resultados se han publicado en las principales revistas del mundo en la temática y se han llevado también a los principales congresos a nivel mundial. Una patente otorgada para el caso particular de formulación fue realizada que evita la aplicación de la reacción de transesterificación. Particularmente en el caso de la microexplosión, análisis de viscosidad y estabilidad, nuestros resultados son de mayor alcance que la mayoría de los que hoy constituyen estado del arte en la temática, pues la mayoría evalúan una emulsión en un motor pero no determinan si ocurre la microexplosión o en qué condiciones físicas y que

formulación específica garantiza que ocurra dicho fenómeno, que es el único que garantiza un proceso eficiente de combustión y reducción de gases contaminantes.

En cuanto a las microalgas como fuente de producción de combustibles alternativos, estos trabajos aún están en la etapa de obtención de biocombustible y evaluación de la biomasa obtenida. No obstante, contar explícitamente con un documento que asegura el interés de una empresa tan importante como Hyundai Europe en probar estos resultados en sus instalaciones es un aval claro del potencial de aplicación que tiene esta parte del trabajo. La evaluación de macroalgas y microalgas que se encuentran en la naturaleza cubana con fines energéticos, son sin dudas un resultado de interés y un punto de partida para futuras investigaciones en esta temática.

Los trabajos en el tema de la *Jatropha curcas* han brindado resultados que son de gran importancia para el actual programa nacional de biocombustibles basado en el uso de *Jatropha curcas*, el cual tiene importante financiamiento gubernamental y también internacional. Algunos autores de esta propuesta de premio participan hoy directamente en dichos proyectos aportando resultados, algunos de los cuales son hoy parte del desarrollo de este tipo de biocombustible para solución de problemas energéticos en zonas rurales específicas de Cuba. Nuestros resultados más relevantes con la *Jatropha* comprenden la evaluación del impacto ambiental y de ciclo de vida de dicha tecnología, así como las pruebas en bancos de motores para evaluar proceso de combustión, eficiencia y emisiones de gases contaminantes. Esos resultados cuentan con tres avales. Uno de ellos de la Estación de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, quien coordina y dirige estas acciones con la *Jatropha curcas* a nivel nacional y con los cuales colaboramos en la parte correspondiente a evaluación de impacto y pruebas mecánicas. Contamos con un aval de CUPET y uno de la Cooperativa de Producción no Agropecuaria Purita, con la cual estamos trabajando ya con la introducción de esta tecnología para la solución de algunos de sus problemas energéticos vinculados al transporte automotor. Esta entidad mediante el desarrollo de cultivos de *Jatropha* en zonas áridas dentro de su área industrial está en condiciones de producir hoy un biocombustible a escala local para su uso en la propia industria contribuyendo de paso a la revitalización de la tierra, que es una propiedad atribuible a este cultivo de biomasa no comestible.

En cuanto a los trabajos de conversión de subproductos de la industria de refinación de aceites vegetales en biodiesel, los principales avales se encuentran en la producción de artículos científicos y sobre todo en el desarrollo de un producto que hoy se encuentra registrado como patente.

Los resultados de modelación matemática para la determinación de propiedades y parámetros de los combustibles alternativos, se encuentran debidamente publicados con varios tipos de modelos desarrollados para predicción, con un considerable ahorro

en la evaluación de biocombustibles para motores diesel que ya es notable en nuestras investigaciones. Particularmente el modelo obtenido para predecir el número de cetano fue publicado en una revista de alto factor de impacto y es ampliamente utilizado por la comunidad científica para la predicción o se ha trabajado en su mejora o modificación. El alcance e impacto de este modelo se puede constatar indirectamente a través de las más de 60 citas bibliográficas que ha recibido en apenas cuatro años.

La obtención de etanol a partir de residuales industriales es una de las líneas más sólidas de esta propuesta y además de una tesis doctoral defendida mediante investigaciones relacionadas con el conocido producto cubano Vimang, se han obtenido resultados con incidencia directa en la Ronera Santa Cruz y en la destilería Jesús Rabí, este último avalado mediante un denominado Logro otorgado por el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de azúcar. Estos resultados ya se encuentran introducidos.

Referencias

1. To, H. and Q. Grafton, *Oil prices, biofuels production and food security: past trends and future challenges*. Food Security, 2015. **7**: p. 323-336.
2. Parietti, M. *Debunking Biofuels: Do they really raise food prices?* 2015 [cited 2016; Available from: <http://www.investopedia.com/articles/markets/111715/debunking-biofuels-do-they-really-raise-food-prices.asp>.
3. Baffes, J., *A framework for analyzing the interplay among food, fuels and biofuels*. Global Food Security, 2013. **2**: p. 110-116.
4. Kristoufek, L., K. Janda, and D. Zilberman, *Correlations between biofuels and related commodities before and during the food crisis: A taxonomy perspective*. Energy Economics, 2012. **34**: p. 1380-1391.
5. Ravindranath, N.H., et al., *Biofuel production and implications for land use, food production and environment in India*. Energy Policy, 2011. **39**: p. 5737-5745.
6. Ajanovic, A., *Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices?* Energy, 2011. **36**: p. 2070-2076.
7. Ciaian, P. and K. d'Artis, *Interdependencies in the energy–bioenergy–food price systems: A cointegration analysis*. Resource and Energy Economics, 2011. **33**: p. 326-348.
8. ElBassam, N., *Handbook of bioenergy crops*, ed. Earthscan2010, London.
9. Pandey, A., et al., *Biofuels from algae*, ed. Elsevier2014, Great Britain: Elsevier.
10. Rodriguez, P., et al., *Impacto medioambiental del aceite de Jatropha curcas utilizado como biocombustible* Ingeniería Química, 2014. **4**(44): p. 33-40.
11. Yano, J., et al., *Life cycle assessment of hydrogenated biodiesel production from waste cooking oil using the catalytic cracking and hydrogenation method*. Waste Management. doi:10.1016/j.wasman.2015.01.014, 2015.
12. Melo-Espinosa, E.A., et al., *Emulsification of animal fats and vegetable oils for their use as a diesel engine fuel: An overview*. Renew Sustain Energy Rev, 2015. **47**: p. 623-633.
13. Sanchez, Y., et al., *Prediction of cetane number and ignition delay of biodiesel using Artificial Neural Networks*. Energy Procedia, 2014. **57**: p. 877-885.
14. Piloto-Rodriguez, R., et al., *Conversion of by-products from the vegetable oil industry into biodiesel and its use in internal combustion engines: a review* Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2014. **31**(2): p. 287-301.
15. Piloto-Rodríguez, R., et al., *Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression*. Energy Conversion and Management, 2013. **65**: p. 255-261.
16. Melo, E., et al., *Emulsified fuels based on fatty acid distillates and rapeseed oil: A physicochemical characterization*. Fuel. DOI 10.1016/j.fuel.2016.08.044, 2016.
17. Autores, C.d., *Biocombustibles para su uso en motores diesel*. ISBN: 978-959-234-095-42014, Habana: IDICT.
18. Melo, E.A., et al., *Performance of a single cylinder diesel engine fuelled with emulsified residual oleins and standard diesel fuel*. . Renewable Energy and Power Quality Journal. ISSN 2172-038, 2014. **X**(12): p. 1-4.
19. Qi, D., et al., *Combustion and emission characteristics of a direct injection compression ignition engine using rapeseed oil based micro-emulsions*. Fuel, 2013. **107**: p. 570-577.
20. Rao, N., B.S. Premkumar, and M. Yohan, *Performance and emission characteristics of straight vegetable oil-ethanol emulsion in a compression ignition engine*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2012. **7**(4): p. 447-452.

21. Mubarak, M. and M. Senthil, *An experimental study on waste cooking oil and its emulsions as diesel engine fuel* in *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*. 2012. Nagapattinam.
22. Subramanian, K.A., *A comparison of water–diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions*. *Energy Conversion and Management*, 2011. **52**: p. 849-857.
23. Kannan, T.P. and M. Rakkiyanna-Gounder, *Thevetia Peruviana biodiesel emulsion used as a fuel in a single cylinder diesel engine reduces NOx and smoke*. *Thermal Science*, 2011. **15**(4): p. 1185-1191.
24. Galle, J., et al., *Experimental investigation concerning the influence of fuel type and properties on the injection and atomization of liquid biofuels in an optical combustion chamber*. *Biomass & Bioenergy*, 2013. **57**: p. 215-228.
25. Islam, M.A., et al., *Combustion analysis of microalgae methyl ester in a common rail direct injection diesel engine*. *Fuel*, 2015. **143**: p. 351-360.
26. Makarevicienė, V., et al., *Performance and emission characteristics of diesel fuel containing microalgae oil methyl esters*. *Fuel*, 2014 **120**: p. 233-239.
27. Tüccar, G., T. Özgür, and K. Aydın, *Effect of diesel-microalgae biodiesel-butanol blends on performance and emissions of diesel engine*. *Fuel*, 2014. **132**: p. 47-52.
28. Al-Iwayzy, S.H., T.F. Yusaf, and R.A. Al-Juboori, *Biofuels from the Fresh Water Microalgae Chlorella vulgaris (FWM-CV) for Diesel Engines*. *Energies*, 2014. **7**: p. 1829-1851.
29. Demirbas, A. and M.F. Demirbas, *Importance of algae oil as a source of biodiesel*. *Energy Conversion & Management*, 2011. **52**: p. 163-170.
30. Piloto-Rodriguez, R., et al., *Thermal behavior of Jatropha curcas oils and their derived fatty acid ethyl esters as potential feedstocks for energy production in Cuba*. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2012. **109**(2): p. 1005-1012.
31. Piloto-Rodriguez, R., et al., *Characterization of Jatropha curcas oils and their derived fatty acid ethyl esters obtained from two different plantations in Cuba*. DOI 10.1016/j.biombioe.2013.07.004. *Biomass & Bioenergy*, 2011.
32. Pereda, J., F. Barriga, and P. Alvarez, *Aprovechamiento de las oleinas residuales procedentes del proceso de refinado de los aceites vegetales comestibles, para la fabricación de biodiesel*. *Grasas y Aceites*, 2003. **54**(2): p. 130-137.
33. Melo, E.A., et al., *Surface tension prediction of vegetable oils using artificial neural networks and multiple linear regression*. *Energy Procedia*, 2014. **57**: p. 886-895.
34. Piloto, R., et al., *Prediction of cetane number of biodiesel from its fatty acid ester composition using Artificial Neural Networks*. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. ISSN 2172-038, 2013. **10**(11): p. 1-5.
35. Martin, C., et al., *Fractional characterisation of jatropha, neem, moringa, trisperma, castor and candlenut seeds as potential feedstocks for biodiesel production in Cuba*. *Biomass & Bioenergy*, 2010. **34**: p. 533-538.
36. Ferrer, C., P.F. Llerena, and M. Mazorra, *Moringa. Árbol de múltiples usos*. ISBN 978-980-7694-00-12014.
37. Díaz, Y., et al., *Extraction and characterization of oil from Moringa oleifera for energy purposes*. *Wulfenia*, 2017. **24**(5): p. 86-103.