



CIENCIAS TÉCNICAS

Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba, 2020

Generación de bioenergía por vía termoquímica para su integración a sistemas energéticos locales

Ramón Piloto Rodríguez ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-2583-4189>
Yosvany Díaz Domínguez ¹ <https://orcid.org/0000-0001-5522-0746>
Elina Fernández Santana ¹ <https://orcid.org/0000-0001-5468-8419>
Índira Tobío Pérez ¹ <https://orcid.org/0000-0002-7445-2507>
Yisel Sánchez Borroto ¹ <https://orcid.org/0000-0002-0661-798X>
Eliezer Ahmed Melo Espinosa ¹ <https://orcid.org/0000-0003-0516-4648>
Marcel Pfeil ² <https://orcid.org/0000-0002-2805-3468>
Sven Pohl ² <https://orcid.org/0000-0003-4646-4823>
Jesús Suárez Hernández ³ <https://orcid.org/0000-0002-6232-1251>
Pedro Rodríguez Ramos ¹ <https://orcid.org/0000-0003-2862-0984>

¹ Universidad Tecnológica de La Habana. La Habana, Cuba

² Universidad de Ciencias Aplicadas de Mittelhessen. Giessen, Alemania

³ Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey. Matanzas, Cuba

* Autor para correspondencia: rpiloto@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

Palabras clave

bioenergía; biomasa; biodiesel; emulsiones

Introducción: La producción de energía a escala local en base a sistemas agroindustriales establecidos, desde un enfoque de sostenibilidad es un aspecto de vital importancia en la actualidad. El presente trabajo muestra resultados obtenidos en el campo de la bioenergía mediante la conversión termoquímica de biomásas para su integración a sistemas energéticos locales. **Métodos:** La investigación comprendió el estudio de varias biomásas cubanas, con potencial para la producción de energía, que no han sido previamente bien estudiadas. Entre las técnicas empleadas se encuentran el empleo de análisis próximo, último, termogravimetría, análisis de contenido de cenizas, su composición y su comportamiento, simulación de procesos, estudio de disponibilidad y su potencial energético, entre otros. **Resultados:** Se optimizó la obtención de aceites y biodiesel, así como se estudió en motores la durabilidad y cuáles son las mezclas combustibles más adecuadas para generalizar en el sector agrícola en Cuba. Se obtuvo una detallada base de datos con la caracterización integral de biomásas, así como la formulación y evaluación de emulsiones a partir de aceite de *Jatropha* y glicerol residual, con reducción de impacto ambiental, costos e incremento de eficiencia. Se estudió la producción de biomasa a partir de *Chlorella vulgaris* y su conversión en biodiesel. En el caso de las macroalgas, se analizó la factibilidad de su uso para la producción de aceite o para conversión termoquímica. En el trabajo se incluyen resultados de análisis de ciclo de vida y de impacto ambiental para algunas de las tecnologías y biomásas incluidas.



Bioenergy generation by thermochemical route for its integration to local energy systems

ABSTRACT

Keywords

bioenergy; biomass; biodiesel; emulsions

Introduction: Energy production at local scale based on established agroindustrial production systems, but with a sustainable approach, is a current important issue. This work shows the results obtained in the field of bioenergy through thermochemical conversion of biomasses for its integration to energy local systems. The research included the study of several Cuban biomasses, with potential for energy production but not well studied for this purpose. **Methods:** Among techniques used to explore their potential for gasification and pyrolysis, the authors applied proximate and ultimate analysis, Thermogravimetry, ash content, ash melting behavior, process simulation, disposal assessment and energy potential. **Results:** The obtaining of non-conventional vegetable oils and biodiesel was optimized. It was studied in engine test benches and endurance tests. The optimal blends to use in the agricultural sector in Cuba were also studied. A detailed database with an integral characterization of selected biomasses is part of the outputs. The formulation and assessment of fuel emulsions based on *Jatropha* and residual glycerol were also developed, with a reduction of the environmental impact and the costs besides an increase in energy efficiency. The production of biomass from *Chlorella vulgaris* and its conversion to biodiesel were part of the study. In the case of algae, the feasibility of their use in oil production or thermochemical conversion was also developed. As a complementary research line, environmental impact and life cycle analysis were assessed for several biomasses.

INTRODUCCIÓN

La biomasa constituye en Cuba el mayor porcentaje de aporte en cuanto a fuentes renovables de energía (FRE) a la matriz energética nacional y así será en las próximas décadas. Esta tiene múltiples salidas energéticas, pero también una fuente casi infinita de subproductos de alto valor agregado, así como de biomateriales, lo cual la hace muy particular y versátil, comparada con otras FRE. ⁽¹⁻³⁾ Por otro lado, se encuentra el enfoque de que tanto la biomasa como los combustibles alternativos o biocombustibles que de ella se derivan, son subvalorados si no resuelven problemas energéticos a gran escala, aun cuando casi ninguna FRE o tecnologías asociadas lo hacen. Con un enfoque más de solución de problemas locales a escala local, a partir de las oportunidades, producciones, condiciones y subproductos que a esta escala se generan, se trabaja actualmente en muchos lugares del mundo, y Cuba comienza a valorar mucho más este tipo de alternativas energéticas.

Las investigaciones en este campo se han venido desarrollando en varias instituciones del país, y se han ido fortaleciendo con el paso del tiempo, así como el enfoque transdisciplinar y la colaboración entre entidades, potenciando el aporte específico y particular de cada una. El presente trabajo se enmarca en la conversión termoquímica, para aglutinar todos

los resultados, que de hecho muestran desde la concepción, la coherencia e interdependencia entre algunos, desde la integración de resultados y problemas identificados, que tienden a trabajar sistemas integrados.

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 Cuba. 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 la demanda energética vinculada al transporte automotor. Sin embargo, existe una disponibilidad de biomásas con potencial energético para la solución de problemas locales.

Los problemas de investigación afrontados en el marco de la presente investigación fueron varios: ¿Cómo aprovechar los desechos agroindustriales que se generan a escala local, para la producción de biocombustibles líquidos?, ¿Cuáles biomásas (de las no ampliamente estudiadas en Cuba) en el entorno cubano son aprovechables para la producción

de energía y solución de problemas a escala local?, ¿Cómo reducir la carga contaminante generada por agroindustrias relacionadas con la producción de aceites vegetales no convencionales?, ¿Cómo, empleando biodiesel, podemos aprovechar de modo más eficiente la energía de combustión en Motores tipo diesel?, Disponer de información que permita acometer estudios de inversión en instalaciones agroindustriales, discriminando entre producir energía a partir de unas biomásas u otras y de alternativas eficientes para la producción de energía en la agroindustria a partir de biomásas locales y disponiendo de las instalaciones actuales.

MÉTODOS

Se partió de la existencia de un grupo importante de biomásas cubanas no estudiadas del todo o sin atención alguna, las cuales tienen un potencial para su uso en la producción de energía (calor o electricidad) para la solución de problemas energéticos locales allí donde mismo está presente o se genera. En el contexto energético cubano, se habla casi en su totalidad de biomásas como el bagazo de caña de azúcar, en menor medida de la cáscara de arroz y por último del marabú (*Dichostachys cinerea*); aunque esta última biomasa no está del todo bien estudiada de manera que se conozca su óptimo aprovechamiento energético. De esta manera se procedió a un estudio exhaustivo e integral de varias biomásas: cáscara de *Jatropha curcas*, cáscara de *Moringa oleifera*, *Dichostachys cinerea*, *Ulva lactuca*, *Chaetomorpha gracilis* y *Sargassum fluitans*.

Estas biomásas fueron colectadas en los lugares donde se generan como desechos o se acumulan por acción propia de la naturaleza. Los estudios incluyeron análisis de composición elemental (C, H, O, N, S), contenido de humedad, cantidad de componentes volátiles y de cenizas, composición de las cenizas (20 componentes), así como el comportamiento de las cenizas (*ash melting behavior*), la cual es un análisis extremadamente importante con vistas a evaluar el comportamiento de las cenizas con la temperatura, que puede en caso de comportamiento negativo traer problemas de impacto en la tecnología y económicos, fundamentalmente en sistemas de gasificación de biomasa. Para ello se desarrolló una peletización de cada biomasa y luego fue sometida a tratamiento térmico bajo observación en el tiempo con cámaras, para monitorear la deformación. ^(4, 5)

Otra parte de este estudio involucró, a partir de los resultados descritos en el párrafo anterior, el desarrollo de la simulación de los procesos de gasificación de estas biomásas, como vía para evaluar la calidad del biocombustible que se obtiene, así como las cantidades relativas de cada producto, los balances de masa y de energía del proceso completo y

de sus etapas. Este resultado constituye una herramienta poderosa para la implementación de condiciones operacionales y factores cualitativos y cuantitativos de las biomásas que alimentan los sistemas de gasificación instalados en Cuba o similares, siempre que haya disponibilidad y necesidad de producir energía a partir de las biomásas en cuestión.

En cuanto a la evaluación del impacto medioambiental de las tecnologías desarrolladas o estudiadas, constituyó un enfoque complementario, que permite una vez desarrolladas o evaluadas las tecnologías, evaluar su impacto ambiental, social y económico, ya sea por vía tradicional, o mediante un análisis de ciclo de vida. En el caso de la *Jatropha curcas* y el *Ricinus communis*, como aceites no convencionales para la producción de energía, ya se obtuvieron resultados al respecto. Se mostraron las bondades de la biomasa de aceite de *Ricinus communis*, o aceite de higuera para ser usado como biocombustible, así como la factibilidad económica de su producción. Se resumieron las consideraciones principales del plan de negocios que lo fundamenta, haciendo mayor énfasis en el proceso financiero y el medioambiental. Se consideraron diecinueve categorías de impacto en el nivel medio y cuatro categorías de impacto en el nivel final.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los ensayos realizados a las biomásas seleccionadas, se elaboró una base de datos que comprende los resultados fundamentales, ^(4, 5) los cuales constituyen una valiosa herramienta de evaluación de biomasa previa a su uso en gasificación o en pirólisis. Mediante la aplicación de termogravimetría fue posible desarrollar una simulación experimental completa de la pirólisis de cada una de las biomásas en estudio para conocer no solo la cinética de estos procesos, sino también el número de etapas en la descomposición térmica y los rangos de temperatura, con vistas a una posterior evaluación en un pirólizador real. ⁽⁴⁾ Uno de los resultados más interesantes y novedoso fue el particular comportamiento de las biomásas basadas en cáscaras, las cuales no fundieron a temperaturas de hasta 1500 °C, mostrando su excelente comportamiento comparado con otras biomásas. El estudio a las biomásas demostró a partir de la caracterización integral aplicada, que son biomásas con mayor calidad para gasificación que otras mucho más tratadas como son la cáscara de arroz y la *Dichostachys cinerea* (esta también fue parte del estudio). Los principales resultados y detalles de esta parte de la investigación están publicados. ⁽⁴⁻⁷⁾ Aunque se continúa el proceso investigativo para la mayor parte de las biomásas, las más importantes ya están simuladas completamente.

La importancia de estos resultados radica en que es un estudio tomando como objeto de estudio las biomásas y no

el gasificador. Se asume como gasificador aquel con las características típicas de los instalados hoy en Cuba, y se simulan los procesos empleando aquellas biomásas que hoy o no se emplean en esos sistemas, o se emplean en condiciones que nos son óptimas, desde el punto de vista energético, económico ni ambiental. Por tanto, la implementación de estos resultados tiene un impacto directo en los sistemas de producción de bioenergía a escala local.

En la parte correspondiente a biodiesel, se constató que la mezcla al 10 % de biodiesel de *Moringa oleifera* y combustible diesel (B10) reduce el consumo del combustible fósil y las emisiones de gases de efecto invernadero. Se realizó una extracción química por disolvente del aceite empleando el método Soxhlet, mientras que el biodiesel se obtuvo a través de una catálisis básica homogénea asistida por ultrasonido; método que permite disminuir el tiempo de la reacción de transesterificación sin afectarse la eficiencia del proceso. Se obtuvieron por primera vez los parámetros del proceso de combustión al probar la mezcla B10 en motor Lister-Petter PH1W. Las emisiones de CO y CO₂ disminuyeron. Se desarrolló un modelo fenomenológico que describe el proceso de extracción de aceite de *Moringa oleifera* en Soxhlet y la difusividad efectiva de dicho aceite, contribuyendo a una extracción de aceite de forma eficiente. ⁽⁸⁻¹⁰⁾

El perfil de ácidos grasos del aceite de *Moringa oleifera* 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 (entre 65 % y 76 %). La presencia característica en la *Moringa* del ácido graso behénico, el cual puede encontrarse hasta en un 7 %, ⁽⁷⁾ determina que su uso con estos fines no sea científicamente recomendado. Se realizó un estudio reológico completo del biodiesel producido. ⁽⁹⁾ Se corroboró que el aceite de *Moringa oleifera* tiene un comportamiento de un fluido newtoniano. Sin embargo, el biodiesel se comporta como un fluido no newtoniano (dilante).

Para la síntesis asistida por ultrasonido ya se cuenta con un estudio del proceso que ha mostrado resultados satisfactorios y superiores a la catálisis básica homogénea (menores tiempos de reacción y menos consumo de energía). Se evaluó el potencial para gasificación y pirólisis del residual agroindustrial que produce esta planta una vez recolectado el fruto. Por último, se evaluó el biodiesel en bancos de motores diesel, caracterizándose las prestaciones del motor, el comportamiento del mismo en mezclas para el proceso de combustión (elemento novedoso adicional) y las emisiones que se derivan de su combustión, comparados con combustible diesel estándar.

En el caso de la *Jatropha curcas*, la cáscara fue estudiada a profundidad en cuanto a su potencial para gasificación o pirólisis. Varios resultados de la presente propuesta lo avalan. ^(6, 7, 11) Hay muy poco publicado en el mundo en cuanto a gasificación y nada respecto a la pirólisis de esta biomasa. Entre los resultados fundamentales se determinó que la cáscara de *Jatropha curcas* es una excelente biomasa para gasificación, mediante la cual, solo empleando la cáscara que genera la agroindustria en la extracción del fruto, puede generarse in-situ suficiente energía para desarrollar los procesos energéticos de la mini industria de producción de biodiesel, cerrando el ciclo a cero desechos y generación de coproductos de alto valor agregado.

Otro resultado fue el desarrollo de una formulación de combustible emulsionado, para el aprovechamiento del glicerol residual de la transesterificación del aceite, para su conversión a biodiesel. Este proceso genera importantes cantidades de este subproducto, para lo cual se desarrolló y patentó un procedimiento que permite formular un biocombustible sin llevar a cabo el proceso de transesterificación, ⁽¹⁰⁾ con considerable economía de tiempo, energía y recursos materiales y financieros.

En el caso de micro y macro algas desde el punto de vista de cultivo de la biomasa y estudio de su potencial para la extracción de aceite, se estudiaron la *Chlorella vulgaris* y la *Chaetomorpha gracilis*. Los resultados en cuanto a la *Chlorella* incluyen evaluación de las condiciones experimentales básicas para la producción de biomasa a partir de esta microalga. Las condiciones de cultivo están descritas en la publicación, ^(12, 13) así como el diseño, simulación y construcción de un fotobiorreactor para la producción de biomasa. El estudio de la macroalga *Chaetomorpha gracilis* arrojó que, desde el punto de vista de extracción de lípidos con vistas a una posible producción de biodiesel, no es técnicamente factible debido al bajo contenido de aceite encontrado. ⁽¹⁴⁾ En este estudio se partió del muestreo de la macroalga en la naturaleza cubana, su procesamiento, extracción y caracterización completa del aceite extraído.

No obstante, la *Chaetomorpha* junto a otras dos macroalgas, fue incluida en el estudio previamente referido de biomásas cubanas y se evaluó su potencial energético para producción de bioenergía mediante gasificación o pirólisis, mostrando que acorde a su nivel de cenizas (porque la humedad ya era conocida acorde a sus características naturales) no es recomendable para la producción de bioenergía. Aunque es un resultado aparentemente negativo, para el caso de las macroalgas, tiene un valor científico importante y fue publicado en una revista de prestigio, dada la novedad e interés que presentan estos resultados.

El trabajo con los destilados de ácidos grasos (DAG) fue enfocado en su uso 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. ⁽¹⁵⁾ Como parte de este trabajo se realizó un análisis del comportamiento del biodiesel que se obtiene por el procesamiento de los DAG en motores. ⁽¹⁶⁾ Estos resultados también son novedosos ya que hay muchos reportes en el mundo del manejo del residual y de la producción de biodiesel a partir de estos, pero no del análisis del proceso de combustión y de su influencia en motores, paso muy importante para su generalización. Como parte de esta investigación se aplicó cromatografía de gases al biodiesel, evidenciando un 50 % de ácido oleico para una conversión a ésteres de un 92 %. Respecto a las pruebas en motores, se evidenció un incremento del consumo específico de combustible y de NO_x en algo más de un 5 %, con reducción del resto de los gases emitidos y acortándose el tiempo de retardo de la ignición. Esto último fue constatado a partir de las mediciones del comportamiento de la presión en el interior de la cámara de combustión.

Los ensayos de durabilidad del motor y el proceso de combustión de mezclas de biodiesel de *Jatropha* y combustible diesel no tienen precedente en Cuba, resaltando la importancia de este trabajo antes de generalizar el uso. A partir de los resultados en banco de prestaciones, combustión, emisiones, durabilidad del motor y corrosión, el estudio logró llegar a un grupo importante de conclusiones para la toma de decisiones, ⁽¹⁷⁾ entre los cuales se encuentran: El biodiesel de *Jatropha curcas* combustiona en menor tiempo que el combustible diesel. Hay un incremento del CEC cuando se emplean mezclas comparado con el combustible diesel debido al menor contenido calórico del biodiesel. Se evidencia un incremento de la presión en la cámara de combustión y en la inyección de combustible con las mezclas. Hay reducción considerable de las emisiones de CO, CO₂ y NO_x cuando se emplea el biodiesel mezclado con combustible diesel hasta un 20 %. Se observan depósitos sólidos y cambio de coloración del combustible para el caso de B20 (20 %) cuando es sometido a ciclos de calentamiento-enfriamiento. Para B20 y B100 hay inestabilidad en el trabajo del motor en las condiciones de carga máxima. El biodiesel (B100) tiene una acción agresiva rápida sobre los elementos con que entra en contacto, por lo que se recomienda utilizar en proporción baja en la mezcla. El efecto corrosivo del biodiesel solo puede ser atenuado empleando mezclas hasta 15 %. Se definió

que la mejora de la calidad del biocombustible debe pasar obligatoriamente por procesos finales de lavado y secado del biodiesel, antes de su mezcla con diesel para su combustión en el motor. Mientras no se disponga de una norma para la producción de biodiesel y haya un estricto control de la calidad del producto final, debe mantenerse como margen de seguridad no trabajar nunca a más de 15 %.

En cuanto a la introducción de los resultados obtenidos, los trabajos en el tema de la *Jatropha curcas* han brindado resultados de gran importancia para el actual programa nacional de biocombustibles basado en el uso de *Jatropha curcas*, con financiamiento gubernamental y también internacional. Los resultados más relevantes con la *Jatropha* comprenden la evaluación del impacto ambiental y de ciclo de vida de dicha tecnología, ⁽¹⁸⁾ así como las pruebas en bancos de motores para evaluar proceso de combustión, eficiencia y emisiones de gases contaminantes, y la selección de las mezclas más adecuadas para su introducción, a partir del ensayo de durabilidad del motor, elementos que son los pasos previos a la introducción de este renglón energético como práctica generalizada.

En cuanto a la emulsificación como alternativa para la producción de combustibles alternativos y mejora de la eficiencia energética durante la combustión, una solicitud de patente fue desarrollada para un caso particular de formulación realizada, ⁽¹⁹⁾ para dar un uso a un subproducto de la transesterificación y reducir costos. También se obtuvieron resultados novedosos en la evaluación de los fenómenos de microexplosión y deformación de la gota. ⁽²⁰⁾

En cuanto a los trabajos relacionados con el empleo de biomásas cubanas, varios de los resultados obtenidos permiten ya pasar a una etapa de implementación en sistemas agroenergéticos locales, allí donde se genera la biomasa, como renglón productivo o como subproducto. La voluntad de generalización de la mayoría de los resultados obtenidos existe dada la importancia para el desarrollo local.

Conclusiones

En este trabajo se desarrolló la evaluación de varias biomásas cubanas con fines energéticos, basado en su potencial para producción de bioenergía para su consumo local. Los estudios abarcaron producción y uso de biodiesel, pirólisis, gasificación, así como la obtención de emulsiones combustibles. Los resultados obtenidos permitieron identificar cual es la mezcla biodiesel-diesel más adecuada para el empleo en transporte agrícola en Cuba. La caracterización y simulación de procesos de diferentes biomásas permitió una evaluación integral de su potencial para producción de energía y fueron desarrollados varios productos y tecnologías asociadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a todos aquellos que colaboraron de una forma u otra en la presente investigación: Danger Tabío, Maylin Rondón, Marianela Ortiz, Simón Konradi, Dominik Denfeld, Leonardo Goyos, Thomas Fischer, Laureano Canoira, Magín Lapuerta, Teresita Romero, Lourdes Zumalacárregui, Osney Pérez, David Bolonio, Jérôme Bellettre, Dominique Tarlet, Agnès Montillet, Sebastián Verhelst, José Ángel Sotolongo, Diego Rubio, Laksmi Penabaz, Yoandy González.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Giwa A, Adeyemi I, Dindi A, García Baños C, Lopresto CG, Curcio S, Chakraborty S. Techno-economic assessment of the sustainability of an integrated biorefinery from microalgae and *Jatropha*: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;(88):239-57.
2. Navarro Pineda FS, Baz Rodríguez SA, Handler R, Sacramento Rivero JC. Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;(54):247-69.
3. Demirbas A. *Biorefineries for biomass upgrading facilities*. 1ra Edición. London: Springer; 2010:240p.
4. Pfeil M, Piloto Rodríguez R, Díaz Y, Sánchez Borroto Y, Melo Espinosa EA, Denfeld D, Pohl S. Data on the thermochemical potential of six Cuban biomasses as bioenergy sources. *Data in Brief* 2020;(29):105-207.
5. Piloto Rodríguez R, Díaz Y, Sánchez Borroto Y, Melo Espinosa EA, Pohl S, Pfeil M. Potential of selected Cuban biomasses for thermochemical conversion into bioenergy; 2019;(2), Mendeley Data. 2019. Disponible en: <https://data.mendeley.com/datasets/sk6m66x4tj/2>
6. Tobío Pérez I, Díaz Y, Pfeil M, Denfeld D, Piloto Rodríguez R, Pohl S. Simulation of the biomass gasification process from *Jatropha curcas* and *Dichrostachys cinerea*. *Revista de Química Teórica y Aplicada* 2020;(77):217-24.
7. Pfeil M, Tobío Pérez I, Denfeld D, Díaz Y, Pohl M, Piloto Rodríguez R. Characterization and assessment of *Jatropha curcas* and *Moringa oleifera* husk and their potential use in gasification. *Energy, Ecology and Environment*. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40974-020-00179-x>
8. Díaz Y, Tabío D, Rondón M, Piloto Rodríguez R, Fernández E. Phenomenological model for the prediction of *Moringa oleifera* extracted oil using a laboratory Soxhlet apparatus. *Grasas y Aceites* 2020. <https://doi.org/103989/gya0664201>
9. Díaz Y, Tabío D, Goyos L, Fernández E, Rondón M, Fischer T, et al. Rheological behavior and properties of biodiesel and vegetable oil from *Moringa oleifera* Lam. *Afinidad Revista de Química Teórica y Aplicada* 2019;(587):83-90.
10. Díaz-Domínguez Y, Tabío D, Rondón M, Fernández E, Muñoz S, Ameneiros JM. Extraction and characterization of *Moringa oleifera* Lam var. *Supergenius* seed oil from Cuba. *Revista CNIC, Ciencias Químicas* 2017;(48):17-26.
11. Piloto Rodríguez R, Tobío I, Ortiz Álvarez M, Díaz Y, Konradi S, Pohl S. An approach to the use of *Jatropha curcas* byproducts as energy source in agroindustry. *Energy Sources, Part A: Recovery,*

Utilization and Environmental Effects 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1749192>

12. González Y, Rodríguez P, Sánchez Borroto Y, Lombardi AT, Candido C. Diseño y simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de la microalga *Chlorella Vulgaris*. *Ingeniería Mecánica* 2019;(22):169-77.
13. Sánchez Borroto Y, Tobío Pérez I, Romero López TJ, Díaz-Domínguez Y, Melo Espinosa EA, Piloto-Rodríguez R. Evaluación de las condiciones experimentales básicas para la producción de biomasa a partir de la microalga *Chlorella vulgaris*. *Afinidad Revista de Química Teórica y Aplicada* 2018;(585): 63-9.
14. Sánchez Borroto Y, Lapuerta M, Melo Espinosa EA, Bolonio D, Tobío Pérez I, Piloto Rodríguez R. Green-filamentous macroalgae *Chaetomorpha cf. gracilis* from Cuban wetlands as a feedstock to produce alternative fuel: A physicochemical characterization. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 2018. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1476931>
15. Piloto Rodríguez R, Melo EA, Goyos L, Verhelst S. 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):287-301.
16. Piloto Rodríguez R, Díaz Y, Melo Espinosa EA, Sánchez Borroto Y, Goyos L, Canoira L, Lapuerta M. Conversion of fatty acid distillates into biodiesel: engine performance and environmental effects. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1587085>
17. Tobío Pérez I. Evaluación de biodiesel de *Jatropha curcas* y mezclas diesel-biodiesel para su uso en transporte agrícola [Tesis de Maestría]. La Habana: Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables; 2019:87p.
18. Rodríguez PA, Zumalacárregui L, Pérez O, Piloto Rodríguez R, Melo Espinosa EA. Life cycle assessment of biodiesel from *Jatropha Curcas* L oil. A case study of Cuba. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 2018. <https://doi.org/10.1080/1556703620181487479>
19. Tobío I, Piloto R. Procedimiento para la obtención de combustibles emulsificados utilizando glicerina cruda como tensoactivo. OCPI. No. 2018-01552018; 2018
20. Melo Espinosa EA, Bellettre J, Tarlet D, Montillet A, Piloto Rodríguez R, Verhelst S. Experimental investigation of emulsified fuels produced with a micro-channel emulsifier: Puffing and micro-explosion analyses. *Fuel* 2018;(219):320-30.

Recibido: 26/05/2021

Aprobado: 06/08/2021

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con ninguna entidad o autor.

Contribución de autoría

- Conceptualización: Ramón Piloto Rodríguez, Elina Fernández Santana, Sven Pohl.
- Curación de datos: Ramón Piloto Rodríguez, Yosvany Díaz Domínguez, Marcel Pfeil, Indira Tobío Pérez, Eliezer Ahmed Melo Espinosa.

- Análisis formal: Ramón Piloto Rodríguez, Elina Fernández Santana.
- Adquisición de fondos: Ramón Piloto Rodríguez, Sven Pohl, Jesús Suárez Hernández.
- Investigación: Ramón Piloto Rodríguez, Yosvany Díaz Domínguez, Elina Fernández Santana, Indira Tobío Pérez, Yisel Sánchez Borroto, Eliezer Ahmed Melo Espinosa, Marcel Pfeil, Sven Pohl, Jesús Suárez Hernández, Pedro Rodríguez Ramos.
- Metodología: Ramón Piloto Rodríguez, Elina Fernández Santana, Sven Pohl, Pedro Rodríguez Ramos.
- Administración del proyecto: Ramón Piloto Rodríguez, Sven Pohl, Jesús Suárez Hernández.
- Recursos: Ramón Piloto Rodríguez, Sven Pohl, Jesús Suárez Hernández.
- Supervisión: Ramón Piloto Rodríguez, Elina Fernández Santana, Sven Pohl.
- Validación: Ramón Piloto Rodríguez
- Visualización: Ramón Piloto Rodríguez, Sven Pohl, Jesús Suárez Hernández.
- Redacción-borrador original: Ramón Piloto Rodríguez, Yosvany Díaz Domínguez.

- Redacción-revisión y edición: Ramón Piloto Rodríguez, Yosvany Díaz Domínguez.

Financiación

Gran parte de las investigaciones desarrolladas fueron financiadas por los proyectos:

BioResCu. Estudio de biomasas cubanas como alternativas energéticas sostenibles y amigables con el medio ambiente. Financiado por BMBF, Alemania.

Bioenergía. Tecnologías limpias para el desarrollo rural. Proyecto nacional financiado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.

Cómo citar este artículo

Piloto Rodríguez R, Díaz Domínguez Y, Fernández Santana E, Tobío Pérez I *et al.* Generación de bioenergía por vía termoquímica para su integración a sistemas energéticos locales. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* [internet] 2021[citado en día, mes y año];11(3): e1039. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1039>

