



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

22



Recuperación de los suelos y disminución de la contaminación mediante el empleo de los biodigestores en el sector cooperativo y campesino de la provincia de Matanzas.....	1
Simulación digital de la reacción de transesterificación.....	17
Estimación de emisiones de metano en vertederos sanitarios.....	26
Influencia del biodiésel sobre la calidad del combustible.....	33
Modelación matemática de una planta para la producción de biodiésel.....	51
Acción lubricante del biodiésel en las mezclas alcohol/diésel.....	64

Recuperación de los suelos y disminución de la contaminación mediante el empleo de los biodigestores en el sector cooperativo y campesino de la provincia de Matanzas

Soil restoration and decrease of the pollution by using biogas digesters in the cooperative and individual peasants sectors in Matanzas province

Por M.Sc. José V. Sánchez Rodríguez, Ing. Armando González Díaz*,
M.Sc. Omar González Santamaría**, Ing. Héctor Correa Almeida***
y Hernán Hernández Rodríguez****

** Asociación Nacional de Agricultores Pequeños (ANAP),
Delegación Provincial, Matanzas, Cuba.*

*** Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS) Rodobaldo López, Matanzas, Cuba.*

**** Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS) Nicomedes Nodarse, Matanzas, Cuba.
e-mail: rebecamtz@minvec.cu*

Resumen

El trabajo expone los resultados obtenidos a partir de la capacitación realizada a los campesinos en la construcción y explotación de diferentes prototipos de biodigestores propuestos en el folleto *Introducción a la producción de biogás*, los cuales incluyen diferentes modificaciones tecnológicas a los diseños originales, con el fin de ahorrar materiales de construcción y superficie de terreno, y contribuir a la impermeabilización de la cúpula de almacenamiento del biogás y el sistema de extracción autónoma de lodos sedimentables. Se refiere la cantidad de biodigestores instalados en el sector cooperativo y campesino (57), de los cuales 31 ya se encontraban construidos, pero sus propietarios le introdujeron algunas de las modificaciones para mejorar su operatividad y funcionamiento. Se expone el volumen de carga contaminante que éstos tratan, así como los beneficios del empleo de biogás obtenido, como fuente renovable de energía. Expone la equivalencia de esta producción con la cantidad de combustibles tradicionales necesarios para requerimientos energéticos similares a los que se resuelven con el empleo del biogás. Hace referencias al uso del biogás en el saneamiento de las jaulas de conejos y aves, en la conservación de granos y el uso de los lodos finales y el efluente líquido como bioabonos, que suministran los nutrientes necesarios para el correcto desarrollo de los cultivos y su contribución al restablecimiento de la vida del suelo, y se destaca la superficie de suelo que se mejora con este tipo de fertilización.

Palabras clave: Biogás, biodigestores, tratamiento de residuales, biofertilizantes.

Abstract

The paper presents the results of the training of peasants in the construction and exploitation of different types of biogas digesters proposed in the brochure *Introduction to the production of biogas*. The results include several technological modifications of the original designs aimed at saving building

materials, land, and contributing to the waterproofing of the dome where the biogas is stored and the system of autonomous extraction of muds. The paper refers the quantity of biogas digesters installed by cooperatives and individual peasants (57). 31 out of the 57 were already built, but their owners introduced some modifications to improve their operativeness and functioning. The paper also describes the volume of polluting load that these biogas digesters processed, as well as the benefits of the use of the biogas obtained, as a renewable energy resource. The paper explains the equivalency of the biogas produced with the quantity of traditional fuels necessary to meet the same energy requirements. The paper also refers to the use of biogas in the sanitation of rabbits and poultry cages, in grains conservation and the use of the residual muds and the liquid effluent as bio fertilizers, that supply the soil the necessary nutrients for the development of crops and its contribution to the replenishment of soil life, specially the improvement of soil surface with this type of fertilizer.

Keywords: Biogas, biogas digesters, waste water treatment, organic fertilizers.

Introducción

Entre los principales problemas que se presentan en las comunidades rurales de la provincia de Matanzas se encuentran la escasez de combustible de uso doméstico para la cocción de alimentos, la inexistencia de infraestructuras para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, el incremento de la carga contaminante de origen animal que se vierte al medio, fundamentalmente a las aguas superficiales y subterráneas, y los relacionados con la deforestación y la pérdida de fertilidad de los suelos.

La incidencia de estos factores sobre la calidad de vida de la población y su negativa influencia sobre el entorno pueden ser disminuidas con la práctica de tecnologías dirigidas al uso racional de los recursos y la protección del medio ambiente, como las encaminadas a la reutilización de los residuales y deshechos en general en la obtención de una fuente segura, eficiente y económica de energía como es el caso del biogás.

La obtención de biogás, además de garantizar una fuente renovable y eficiente de energía para diferentes usos (cocción de alimentos para personas y animales, alumbrado, alimentación de motores de combustión interna, generación de corriente eléctrica, conservación de granos, etc.), permite la producción de un abono orgánico de muy buenas características en cuanto al aporte de nutrientes al suelo, en su contribución al mejoramiento de sus características físicas y mecánicas, mejorando su textura, retención de humedad y aereación, así como por su contribución al restablecimiento de los macro y micro organismos beneficiosos del suelo.

El uso de los residuales sólidos de origen animal generados por los sistemas de cría de las cooperativas y la población rural en general, contribuye a la disminución de la carga contaminante que se vierte al medio ambiente, y al no tener los pobladores que depender de la leña y el carbón como fuentes de energía repercute también en la preservación de la cobertura vegetal, pues evita talar los árboles para ser utilizados como combustible.

Se conoce que casi tres mil millones de personas en el mundo emplean todavía leña como fuente de energía para calentar agua y cocinar, lo que provoca,

junto a otros efectos, que anualmente se pierdan en el mundo entre 16 y 20 millones de hectáreas de bosques tropicales y zonas arboladas [Lugones, 2003].

Con el empleo de tecnologías que contribuyan a la disminución de la dependencia de los pobladores rurales de los bosques como única fuente para la obtención de combustible doméstico (carbón vegetal y leña), se mitigan los procesos erosivos del suelo vinculados a la deforestación por la tala de los árboles, acción que incrementa los efectos de la erosión hídrica y eólica, al eliminar la cobertura vegetal que lo protege [Sánchez, 2003]. Mediante la regulación del uso de los bosques se contribuye a evitar la compactación de los suelos; al encontrarse éstos protegidos por la vegetación se disminuye también la acidificación o pérdida de elementos que forman el complejo catiónico y se evitan los procesos de salinización.

Otro aspecto de gran importancia es la necesidad de realizar acciones encaminadas a la disminución progresiva de la carga contaminante que se vierte a las aguas dulces superficiales y subterráneas. Por este motivo es necesario emprender acciones encaminadas al uso ambientalmente seguro de todas aquellas sustancias que constituyen contaminantes para las aguas y que potencialmente pueden ser transformadas en otras inocuas para este medio

y generar, además, algún uso socialmente útil en beneficio de las comunidades locales.

Contrariamente a lo que pueda suponerse, el agua es un recurso limitado, finito. Existe una cantidad relativamente fija en el planeta, que se estima en unos 1 400 millones de km³, pero la mayor parte de ella, 97,2% es agua salada, de muy escasa utilidad para el consumo humano. Hay 2,15% más que se encuentra en los glaciares y los casquetes de hielo que forman los polos. El resto, y no mucho, es agua dulce superficial y subterránea, pero la primera solamente representa unos 136 000 km³, menos de 0,7% de todas las aguas dulces, en los ríos, los lagos, el suelo, los pantanos, la atmósfera y los seres vivos. De hecho, 99% de toda el agua existente en la tierra se encuentra congelada o en los océanos [López, 2002].

Como el volumen de agua dulce no se puede aumentar y cada vez más personas dependen de ese suministro fijo, cada vez es mayor el volumen de agua dulce contaminado. El consumo mundial de agua dulce se multiplicó por seis entre 1900 y 1995, de manera que aumentó a una tasa mayor que el doble del crecimiento de la población, a razón de cien millones de metros cúbicos por año desde 1940 [López, 2002].

De lo anteriormente expuesto se deduce que es una responsabilidad ciudadana la realización de acciones encaminadas a transformar todas aquellas sustancias contaminantes en otras menos agresivas y compatibles con el medio ambiente [Sánchez, 2003].

Desde que el hombre aprendió a emplear el fuego, la cocción de alimentos ha llegado a ser una de las actividades fundamentales para su subsistencia. Para

esto se han utilizado diferentes combustibles, entre ellos la leña y el carbón vegetal. En respuesta a esta situación surgen varias alternativas para llevar a cabo la cocción de alimentos, que tienen bajo impacto ambiental y su fuente de energía es considerada renovable, una de ellas resulta la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de la materia orgánica.

Según la literatura, fue en La India donde se construyó la primera instalación para producir biogás, en fecha cercana al año 1900; a partir de ese momento se ha incrementado el número de biodigestores, y actualmente funcionan en ese país alrededor de 200 000 unidades. China es hoy la región que tiene un mayor número de este tipo de instalaciones, con aproximadamente 6,7 millones de biodigestores [Lugones, 2003].

La producción porcina moderna, de carácter intensivo y concentrado territorialmente, genera cantidades importantes de estiércoles y purines que no se pueden utilizar de forma directa como fertilizantes en las zonas donde se generan.

En Cuba, dadas las características de su base productiva, la aplicación de tecnologías para la producción de biogás ha estado dirigida fundamentalmente a residuales de ingenios azucareros y fábricas de derivados de la caña de azúcar [Pérez, 1985; Guillermo, 1985; Valdés, 1990; Fonte y Martínez, 1996; Pérez y Mazorra, 1996, y Fonte, 1997], de plantas procesadoras de café [Bermúdez, 1995, y Viñas, 1995] y de instalaciones pecuarias [Sánchez, 1994; IIP, 1998, y Lezcano y Pérez, 1999].

Desarrollo

El hombre para su normal desarrollo necesita de un suministro balanceado de sustancias nutritivas que se incorporan a través de su dieta. Para esto necesita que sus alimentos aporten carbohidratos, los cuales son la fuente directa de energía para su organismo, pero también necesitan de las proteínas para la formación de nuevos tejidos que van sustituyendo los que constantemente van envejeciendo, así como de vitaminas para catalizar la mayoría de los procesos de asimilación de diferentes nutrientes, las cuales se obtienen a través del consumo de frutas y vegetales frescos.

La satisfacción de estas necesidades vitales requiere de una producción constante y creciente de alimentos de diferentes composiciones, siendo uno de los más importantes la carne y otras fuentes de suministro de proteínas. Para esto se ha desarrollado la ganadería, tanto la mayor como la menor. Este desarrollo lleva consigo el incremento de la cría de diferentes especies de animales de forma intensiva, lo cual se realiza fundamentalmente de forma estabulada, lo que genera grandes cantidades de desechos de alta carga orgánica que constituyen contaminantes ambientales, como es el caso de los estiércoles y los purines de la cría de cerdos.

El tratamiento ambientalmente seguro de estos residuales constituye una constante preocupación de las personas que se dedican a este trabajo.

Por otro lado el incremento marcado y ascendente de la población del planeta demanda cada día de una mayor cantidad de alimentos para satisfacer sus

necesidades nutritivas. La situación es cada vez más alarmante, ya que debido al mal uso de los suelos éstos han ido perdiendo de forma progresiva su fertilidad debido a la aplicación de prácticas agrícolas inadecuadas con un marcado carácter esquilante de los recursos del suelo y con un creciente deterioro de la vida de los micro y macroorganismos responsables de los procesos de transformación y reconversión de los nutrientes, lo cual se debe en gran medida al uso y abuso de los agroquímicos para el control de las plagas y enfermedades, así como por el empleo indiscriminado de los fertilizantes químicos.

Lo antes expuesto explica la disminución progresiva que ha ido experimentando el rendimiento de las producciones agrícolas debido al deterioro del suelo, el cual también se ve afectado por la creciente erosión a que se ve sometido a consecuencia de los procesos de deforestación y tala indiscriminada de los bosques, con lo que se elimina su protección natural, tanto por la vegetación como por coberturas muertas formadas por los restos de los árboles y otros organismos que durante su proceso de descomposición, además de proteger el suelo, contribuyen a conservar su humedad y mantener la vida de toda la fauna edáfica, cuya función es primordial para mantener el necesario equilibrio que sustenta los procesos de reciclaje de la materia orgánica y mantiene la vida sobre el planeta.

El estado actual de la población humana en crecimiento progresivo, y con necesidades en constante incremento, demanda con urgencia la conservación de los ecosistemas naturales, lo que implica un uso sostenible de los mismos. Para ello es menester que este uso se corresponda con las verdaderas necesidades humanas de las presentes generaciones, como condición para salvaguardar la satisfacción de las futuras [López, 2002].

Entre los problemas de la contaminación ambiental se encuentran la contaminación de las aguas y la degradación de los suelos.

Las acciones encaminadas a la preservación de la capacidad productiva de los recursos naturales están de acuerdo con lo legislado en la Ley 81 «Ley del Medio Ambiente», en su artículo 132, incisos a, b, c, y f. Esta Ley, en su artículo 125, plantea: «...en el aprovechamiento de los recursos energéticos por cualquier persona natural o jurídica se tenderá preferentemente, siempre que ello sea viable, a la utilización de fuentes renovables de energía y de equipos, tecnologías y medidas técnicas y organizativas que estimulen la conservación y el uso sostenible de la energía...».

Esta es la política seguida en el tema de la aplicación de la digestión anaerobia para el tratamiento de los residuales de la cría de animales domésticos estabulados, con el fin de disminuir el volumen de contaminantes emitidos directamente al medio, incidir en la protección de la cobertura boscosa y en la obtención de combustible doméstico y bioabono, con lo cual también se mejora la calidad de vida de los miembros de la comunidad que participan directamente en el proyecto de montaje, explotación y mantenimiento de los biodigestores.

Biodigestores para la producción de biogás

El desarrollo de tecnologías para el tratamiento anaerobio de residuales estuvo, desde sus inicios, determinado por sus innegables ventajas técnicas y económicas. Los estudios realizados sobre los costos de inversión de plantas de tratamiento indican que en la medida que aumenta la carga orgánica que debe tratarse, son más evidentes los beneficios de los procesos anaerobios sobre los aerobios, inclusive para plantas donde se combinen ambos tipos de tratamientos [Eckenfelder, 1988, citado por Loyola, 1992, y Ramos, 1996].

Precisamente por eso, a partir de la segunda mitad del siglo xx, se realizó un importante esfuerzo de investigación y desarrollo tecnológico que rindió sus frutos a partir de los años sesenta. Como consecuencia surgieron reactores que permitieron incrementar la biomasa activa en su interior y desacoplar el tiempo de retención celular (TRC) del tiempo de retención hidráulica (TRH). Esto proporcionó incrementos importantes en la eficiencia a altos valores de carga orgánica. Pérez [2000] señala que Noyola en 1994 realizó un estudio sobre el escalado de los biodigestores anaerobios y desde el punto de vista evolutivo los clasificó en tres tipos: biodigestores de primera, segunda y tercera generaciones. En el caso que nos ocupa en este trabajo centraremos la atención en los biodigestores de primera generación.

Biodigestores de primera generación

En los biodigestores de primera generación la biomasa se encuentra sedimentada y existe un mínimo contacto con el sustrato, o en suspensión sin recirculación de sólidos, de lo que se deriva una relación unitaria entre el tiempo de retención celular y el tiempo de retención hidráulica ($TRC/TRH = 1$). Estas condiciones de operación dan lugar a que la eficiencia en la remoción de la materia orgánica sea baja, con producciones que no sobrepasan 1,5 m³ de biogás por m³ de biodigestor. Las variantes de estos tipos de biodigestores se emplean para el tratamiento de residuos sólidos y la estabilización de lodos. Ejemplos de los mismos son los biodigestores convencionales, en particular los de cúpula fija y los de campana flotante, desarrollados en China y la India, respectivamente [Pérez, 2000].

Recientemente se han desarrollado otros modelos más sencillos de tipo tubular contruidos con materiales baratos (cloruro de polivinilo, polietileno, entre otros) y de mayor simplicidad en el manejo y mantenimiento [Khan, 1996]. Sin embargo, su aplicación se limita a pequeña y mediana escala [Sosa, 1999], siendo cuestionable su tiempo de vida útil, fundamentalmente en zonas rurales.

En cuanto a su capacidad, pueden identificarse dos clasificaciones para las plantas de producción de biogás: las instalaciones industriales (generalmente de segunda o tercera generación) y las de pequeña capacidad o biodigestores (de primera generación). En el presente trabajo se hace énfasis en las instalaciones de pequeña capacidad, pues son las que se ajustan a las condiciones del lugar, y el biogás puede ser utilizado para solucionar el problema de la cocción de alimentos en los núcleos familiares, lo que contribuye a preservar el medio ambiente y a la obtención de bioabonos para el mejoramiento de los suelos, con el correspondiente incremento de los rendimientos agrícolas.

Actualmente se conocen dos diseños tradicionales de biodigestores de pequeña capacidad (hasta 50 m³) de producción de biogás, en dependencia de su origen: de campana flotante (modelo hindú) y de cúpula fija (modelo chino).

El biodigestor hindú se distingue por el uso de una campana móvil, que asciende al aumentar la presión del gas. La campana puede ser de metal, hormigón, ferrocemento, ferrobambú o plástico. Además, el biodigestor está compuesto por un tanque de almacenamiento en forma cilíndrica, que puede ser construido de piedra, ladrillo y hormigón. Para permitir la entrada de la materia orgánica y la salida del bioabono se emplean dos tubos (de plástico, fibrocemento, cerámica u otros) que conectan el tanque de almacenamiento con el de carga y descarga. También cuenta con tuberías, válvulas de corte y seguridad que garantizan el buen funcionamiento del biodigestor [Lugones, 2003].

El diseño del tipo chino utiliza para el almacenamiento de biogás una cúpula fija unida al tanque de almacenamiento, que puede ser de ladrillo o de elementos prefabricados de hormigón. Estas instalaciones tienen como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a 20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

Estos sistemas poseen como desventaja el alto costo de la inversión inicial; por ejemplo, una instalación de 5 m³ tiene una inversión inicial de 700 a 900 USD, lo que ha impedido su generalización en América Latina [Lugones, 2003]. Actualmente se han probado nuevos diseños que han logrado disminuir considerablemente los costos iniciales de los biodigestores. Una de estas instalaciones son las plantas de biogás hechas de polietileno. Este sistema puede tener distintas configuraciones (alargado, en forma de gusano o en forma de saco), y es de fácil instalación. Los componentes fundamentales de este biodigestor son: un bolso de polietileno de película delgada capaz de soportar las presiones normales de trabajo del biogás y donde se almacena la excreta mezclada con agua; siempre se debe dejar el volumen necesario para almacenar el biogás; con el fin de lograr el buen funcionamiento de la instalación son necesarios otros accesorios, como válvulas de corte y de seguridad, tuberías y adaptadores.

Este tipo de biodigestor es muy económico; su costo es de aproximadamente 50 USD por cada persona. Entre sus desventajas se haya su bajo tiempo de vida útil, lo que hace necesario montar una nueva instalación aproximadamente cada tres años. También es muy vulnerable a sufrir roturas por condiciones climáticas adversas, por acciones del hombre y los animales.

Otro tipo de biodigestor para la producción de biogás en la que se ha logrado disminuir los costos hasta 30% con respecto a los prototipos tradicionales, es el que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil del modelo hindú o de la cúpula fija del modelo chino, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo, como los empleados en los prototipos tradicionales. Este tipo de instalación tiene la ventaja que resulta más económico que los sistemas tradicionales; por ejemplo, una instalación de 4 m³ puede costar, aproximadamente, 550 USD, y la estructura de polietileno flexible puede llegar

a alcanzar hasta diez años de vida útil, si no sufre ningún daño mecánico por manejo inapropiado o por otros factores externos, como la incidencia directa de las radiaciones solares.

Uso de los biodigestores para el tratamiento de los residuales y la generación de biogás y abono orgánico en el sector cooperativo y campesino en Matanzas

Los campesinos cubanos se encuentran organizados desde el punto de vista productivo y social en dos formas básicas: las cooperativas de producción agropecuarias (CPA), en las cuales la propiedad es colectiva y se organiza la producción y los servicios acorde a lo que se decida en la junta directiva de la cooperativa, respondiendo a intereses de desarrollo comunes; y las cooperativas de créditos y servicios (CCS), en las cuales cada campesino es dueño de su finca de forma independiente y se agrupan para establecer las prioridades en la producción, y cuando se encuentran fortalecidas cuentan con una estructura administrativa profesional que se encarga de las gestiones comunes a todos los campesinos.

En ambas formas de asociación prima la satisfacción de los intereses propios del campesinado y su objetivo fundamental es la producción de alimentos. Atendiendo a la necesidad de producir de la forma más sostenible posible y partiendo de la necesidad del aprovechamiento económico de todo aquello que pueda representar un beneficio para la colectividad y para el entorno, así como de la inminencia de buscar alternativas para la recuperación de los degradados suelos con los que tienen que producir, es que se toma conciencia por parte de los campesinos de la conveniencia del uso de los biodigestores como una fuente de obtención de energía renovable para usos domésticos y otros propios del trabajo en las condiciones de la producción rural, así como para la producción de abonos orgánicos que permitan restituir los nutrientes que se han ido agotando en el suelo con el laboreo intensivo a que estos se encuentran sometidos, así como de la necesidad de que estos abonos también contribuyan a restituir la vida del suelo y permitan el desarrollo de los procesos de transformación y recirculación de materia en el ciclo de desarrollo de los cultivos.



Fig. 1. Una de las decenas de plantas de biogás instaladas en la provincia de Matanzas.

Con el empleo de los biodigestores los campesinos han aprendido a transformar los residuales de la cría de animales estabulados (estiércol) de una fuente de contaminación ambiental considerable en una solución a varios problemas de importancia capital para el correcto desempeño de su labor, ya que a través del proceso de digestión anaerobia el estiércol se transforma en biogás que puede ser utilizado para la cocción de los alimentos en el hogar, así como de la comida de los animales, para alimentar un motor de combustión interna con el que se puede accionar un molino o una bomba de agua para el regadío o el suministro a los animales o mover un generador de electricidad. Este biogás también puede ser utilizado para la conservación de granos en recipientes cerrados, como tanques de 55 galones o silos metálicos, ya que al ser suministrado dentro del recipiente se crea una atmósfera anaeróbica en la cual no sobreviven los micro y macroorganismos que deterioran los granos. También puede ser utilizado para flamear las jaulas donde se crían los conejos y de esta forma eliminar enfermedades, como la sarna y otras.

Los lodos producidos como resultado de la digestión anaeróbica dentro del biodigestor, así como los efluentes líquidos del proceso, constituyen excelentes abonos orgánicos que aportan macroelementos importantes para el desarrollo de las plantas, y también aportan cantidades significativas de microelementos que son tan importantes como los primeros para que la planta se desarrolle adecuadamente, pues estos desempeñan en las plantas una función similar a la que desempeñan en los animales las vitaminas, ayudando a fijar aquellas sustancias que son de vital importancia para su correcto desarrollo.

Otro aspecto de singular importancia en el empleo de los lodos finales y los efluentes líquidos del proceso de digestión anaeróbica durante la producción de biogás, es el aporte que estos hacen al restablecimiento de la vida de la micro y macrofauna edáfica, que es la encargada de la realización de los procesos de transformación y asimilación de los nutrientes que las plantas necesitan. Precisamente la pérdida de la vida en el suelo es uno de los principales problemas que presentan los suelos altamente degradados. Esta se origina por diversas causas, entre las que se puede destacar el uso excesivo de productos químicos, los cuales terminan por eliminar la vida del suelo, lo salinizan y alteran su estructura químico-física.

Tabla 1. Distribución de biodigestores por municipios en el SCC

Municipio	Total de biodigestores
Cárdenas	18
Pedro Betancourt	5
Jovellanos	13
Los Arabos	1
Colón	0
Limonar	5
Martí	0

Jagüey Grande	2
Unión de Reyes	8
Perico	1
Matanzas	4
Total	57

Como puede observarse, aún el número de biodigestores en el Sector Cooperativo y Campesino (SCC) es bajo, dadas las potencialidades que posee; no obstante, los resultados que se han ido obteniendo por parte de aquellos que explotan estos sistemas para generar biogás con el fin de emplearlo para satisfacer las necesidades de energía para la cocción de los alimentos, tanto para las personas como para los animales, así como con otros fines como los ya expuestos, han contribuido a la creación de las bases para el incremento sostenido de esta tecnología limpia entre la población rural y la suburbana.

Otro aspecto que ha incidido de forma satisfactoria en la toma de conciencia sobre las ventajas del empleo de los biodigestores, es el incremento de los rendimientos de los cultivos que se fertirriegan con el lodo y los efluentes líquidos, ya que han podido apreciar que estos experimentan un aumento superior a 25% en todos los cultivos en los que se han empleado.

Este resultado alcanza incluso la producción de cultivos tan sensibles como la frutabomba, la cual requiere en condiciones normales del empleo de una gran cantidad de agroquímicos para contrarrestar las plagas y enfermedades que la atacan. Se ha logrado la producción de una hectárea de frutabomba desde la siembra de las posturas hasta la cosecha sin emplear un solo gramo de producto químico, solo con el fertirriego con lodo de biogás. Este resultado se obtuvo en la finca del campesino Omar González, perteneciente a la CCS Rodobaldo López, del municipio de Cárdenas, en la localidad de Cantel, lo cual pudo ser apreciado por los participantes en el Taller de Agroecología del tercer paso de la aplicación de la metodología de promoción agroecológica de campesino a campesino, desarrollada en la finca del propietario de la citada plantación.



Fig. 2. Fertirriego con lodo de biogás a la frutabomba del campesino Omar González.

También los resultados obtenidos en las plantaciones de plátano han rebasado el incremento de 25% de los rendimientos tradicionales, y se logran producciones por hectárea que han alcanzado 50% de incremento de la productividad. En la finca del campesino Omar González puede apreciarse la presencia de un platanar de la variedad macho $\frac{3}{4}$ con una antigüedad de seis años, que continúa produciendo con una gran vitalidad y con racimos de un tamaño superior a los que se producen con el uso de las técnicas tradicionales.

Se han obtenido resultados satisfactorios con el empleo de este tipo de biofertilizante en los cultivos de soya, frijol, sorgo y en hortalizas, fundamentalmente las que no se comen crudas.

Cuando se promueve la tierra que ha sido fertilizada con el lodo o el efluente líquido del biodigestor se puede apreciar la presencia de múltiples variedades de micro y macroorganismos, lo que se aprecia por la coloración que se observa en la tierra. Esta es la manifestación del restablecimiento de los micro y macroorganismos edáficos, y a su desarrollo se debe el restablecimiento de la fertilidad de estos suelos.

Por tanto, se puede plantear que el beneficio de este tipo de fertilización no se encuentra solo en el aporte que se le realiza al suelo de los macro y microelementos que se le van agotando con el desarrollo de las sucesivas cosechas, sino también al restablecimiento de la vida en el suelo a través del aporte de microorganismos benéficos provenientes del proceso de digestión anaerobia que se produce dentro del biodigestor.

Repercusión del uso de los biodigestores en el SCC de la provincia de Matanzas

Si se parte de que en un biodigestor de cúpula fija, modelo chino, por cada metro cúbico de volumen del mismo se generan entre 0,75 y 1,3 m³ de biogás, y considerando todos los biodigestores de 14 m³ (volumen promedio de todos los biodigestores existentes en el SCC), entonces se puede plantear que en dependencia de la eficiencia del funcionamiento de estos 57 biodigestores, obtendremos:

- Entre 546 y 946,4 m³ de biogás por día, lo que equivale en términos de energía a:

Entre 388,7 y 674,31 L de petróleo.

Entre 370,76 y 643,18 L de keroseno.

Entre 657,8 y 1 141,14 L de alcohol.

Entre 478,4 y 829,92 L de gasolina.

Entre 371,07 y 643,18 L de gas natural.

Entre 741,52 y 1 286,37 kg de carbón vegetal.

Entre 2 093 y 3 630,9 kg de leña.

- Entre 218 452,5 y 378 651 m³ de biogás por año, lo que equivale en términos de energía a:

Entre 141 993,88 y 246 123,15 L de petróleo.
 Entre 135 440,55 y 234 763,62 L de keroseno.
 Entre 240 297,75 y 416 516,1 L de alcohol.
 Entre 174 762 y 302 920,8 L de gasolina.
 Entre 135 440,55 y 234 763,62 L de gas natural.
 Entre 270 881,1 y 469 527,24 kg de carbón vegetal.
 Entre 764 583,75 y 1 325 278,5 kg de leña.

Desde el punto de vista de la repercusión ambiental del funcionamiento de estos 57 biodigestores, si se continúa considerándolos todos de un volumen de 14 m³, al cabo de un año de funcionamiento se habrán tratado 3 650,85 TM de carga contaminante. Si se parte de la obtención de biogás con una composición promedio de 60% de CH₄, 36% de CO₂, 2% de H₂, 1,5% de N₂, 0,1% de H₂S y trazas de vapor de H₂O, y se considera el volumen molar (VM), es decir, el volumen que ocupa un mole de cualquier gas en condiciones de temperatura y presión estándar ambiental (TPEA), igual a 24,8 dm³/mol, se puede calcular la masa de cada m³ de biogás generado. Para ello es necesario también el conocimiento de la masa molar de cada una de las sustancias que forman la mezcla de gases conocida como biogás:

M(CH₄) = 16 g/mol
 M(CO₂) = 44 g/mol
 M(H₂) = 2 g/mol
 M(H₂S) = 34 g/mol
 M(H₂O) = 18 g/mol

Con estos datos se puede determinar el valor promedio de la masa molar del biogás obtenido: 1 mole de biogás a TPEA tendrá la composición siguiente:

0,6 mole de CH₄ = 9,6 g
 0,36 mole de CO₂ = 15,84 g
 0,02 mole de H₂ = 0,04 g
 0,015 mole de N₂ = 0,42 g
 0,001 mole de H₂S = 0,034 g
 Trazas de H₂O(g)

Por lo que se puede plantear, a partir de la suma de la masa de cada uno de sus componentes, que la masa promedio de un mole de biogás, de la composición planteada, es de 25,934 g/mol.

A partir de este valor y del volumen molar se calcula finalmente la masa de 1 m³ de biogás. M(biogás) = 25,934 g/mol

VM = 24,8 dm³/mol
 0,025934 kg / 0,0248 m³ = 1,04572 kg/m³

Por lo que la masa de 1 m³ biogás a TPEA = 1,04572 kg

Partiendo de la producción de biogás por año de los 57 biodigestores analizados (228,44 TM de biogás) y considerando el volumen de carga contaminante tratada, se obtiene:

- La producción de 3 422 41 TM de lodos finales (bioabono).
- La disposición de entre 1 825 425 y 5 476 27 m³ de efluente líquido para el fertirriego.
- Se habrá salvado el equivalente a 32,5 ha de bosques de la deforestación.
- Se habrá dejado de quemar el equivalente a 8 225 67 m³ de madera para hacer carbón vegetal.
- Si se considera que en el tema de la deforestación el PNUD valora en 25,00 USD/m³ de madera dejado de talar, entonces se habrán ahorrado 205 641,75 USD con el funcionamiento de los 57 biodigestores del SCC en la provincia de Matanzas.
- Se habrá producido la energía equivalente a 11 571 sacos de carbón vegetal.

De acuerdo con la norma de aplicación de humus de lombriz (de 4 a 8 TM/ha) y de materia orgánica (10 TM/ha) para cultivos varios y considerando que el lodo de biogás posee características similares a la del humus de lombriz desde el punto de vista de su capacidad para restituir las condiciones físico-químicas y biológicas del suelo, entonces se puede plantear que con el lodo generado por el funcionamiento de los 57 biodigestores en explotación en el SCC de la provincia de Matanzas se pueden fertilizar 570,40 ha de cultivos varios, con lo que se logra elevar en más de 25% los rendimientos de los cultivos que en las mismas se cosechen, usando como norma de aplicación 6 TM/ha.

Las potencialidades para la producción de biogás y bioabono a partir del uso económico de los residuales de la cría de animales en cautiverio son realmente altas. Si se parte de la existencia de los convenios porcinos en la provincia se obtienen los resultados siguientes (Tabla 2):

Tabla 2. Cantidad de convenios porcinos en el SCC y su aporte diario de contaminantes

	Cantidad de convenios	Preceba			Reproductoras			
		Convenios	Cerdos	Est/día	Convenios	Puercas	Est/día	Cerditos
CCS	953	183	10 822	24 349,5	770	1 460	3 285	13 140
CPA	31	15	855	1 923,7	16	35	78,75	315
Total	984	198	11 677	26 273,2	786	1 495	3 363,75	3 455

Tabla 3. Volumen de biogás que se puede generar por día a partir de los convenios porcinos y carga contaminante que se puede tratar

Preceba			Reproductoras (solas)	
	Volumen de biogás, m ³	Carga contaminante, TM	Volumen de biogás, m ³	Carga contaminante, TM
CCS	1 093,022	48,7	147,5	6,6
CPA	86,35	3,8	3,5	0,2
Total	1 179,37	52,5	151	6,8

Tabla 4. Volumen de biogás que se puede generar por año y su equivalencia en diésel, a partir de los residuales de los convenios porcinos

	Preceba		Reproductoras (solas)	
	Volumen de biogás, m ³	Equivalencia en diésel, L	Volumen de biogás, m ³	Equivalencia en diésel, L
CCS	398 953,03	259 319,46	53 822,9	34 984,88
CPA	31 519,57	20 487,72	1 290,27	838,67
Total	430 472,6	279 807,18	55 113,17	35 823,55

Tabla 5. Cantidad de lodo de biodigestores que se puede generar por año y superficie de suelo que se puede mejorar con el empleo de estos residuales

	Cantidad de lodo que se puede generar, TM	Superficie de suelo que puede ser tratado, ha
CCS	20 184,5	3 364,0
CPA	1 460,0	243,3
Total	21 644,5	3 607,3

Conclusiones

La cría de animales estabulados genera una gran cantidad de residuales que constituyen contaminantes de alta carga orgánica, cuya disposición directa al medio ambiente provoca la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, y genera también una contaminación atmosférica de consideración por la emisión de gases de una fuerte incidencia en el efecto invernadero, como es el caso del metano, cuyo efecto es 21 veces superior al del dióxido de carbono.

Con el empleo de los biodigestores pueden ser aprovechados económicamente estos residuales para la obtención de biogás, el cual es una fuente renovable

de energía, y producir a partir de los lodos finales y el efluente líquido del proceso un bioabono de mucho valor para restaurar los nutrientes y restablecer la vida del suelo, con lo que se logra un incremento superior a 25% en los rendimientos de los cultivos cuyo suelo ha sido tratado con bioabono.

Recomendaciones

1. Capacitar a los tomadores de decisiones y trabajadores vinculados con la cría de animales estabulados en las ventajas del uso de los biodigestores.
2. Utilizar los biodigestores como sistema para el tratamiento de los residuales de alta carga generados por la cría de animales estabulados.
3. Aprovechar los residuales de alta carga orgánica de la cría de animales estabulados para la producción de biogás y bioabonos.
4. Emplear los lodos finales y el efluente líquido de los biodigestores en la fertilización y recuperación de los suelos.

Bibliografía

BERMÚDEZ, R. C. «Aprovechamiento biotecnológico de residuos por fermentación anaerobia en la obtención de biogás y otros metabolitos». Curso de postgrado. Riobamba, Ecuador: ESPOCH, 1995.

FONTE, A.; N. MARTÍNEZ Y S. MONTALVO. «Digestión anaeróbica de efluentes generados en plantas procesadoras de cera de caña», en *Resúmenes del 47 Congreso ATAC*. La Habana: 1997. p. 99.

FROSTELL, B. «Process Control in Anaerobic Treatment», *Water Science Technology*, vol. 17. Tampere, 1988. p. 173-189.

GUILLERMO, A. «Biogás del tratamiento de residuos azucareros en un reactor horizontal», en *Revista Cuba Azúcar*. La Habana: 1985. p. 13.

Instituto de Investigaciones Porcinas. «Procedimiento biotecnológico para la depuración de residuales porcinos y la conservación de alimentos para cerdos», en *Informe del Instituto de Investigaciones Porcinas*. La Habana: 1998.

LEZCANO, P. Y J. L. PÉREZ. «Tecnología para la producción de biogás, alimento animal y biofertilizantes a partir de la digestión anaerobia de residuales con alto efecto contaminante», en *Memorias: La Educación Superior Cubana: Oportunidades de Cooperación Internacional*. La Habana: 1999.

LIN, C. Y. *et al.* «Temperature Characteristics of the Methanogenesis Process in Anaerobic Digestion», *Water Science Technology*, vol. 19, p. 299-310, 1985.

LÓPEZ, C. *et al.* *Introducción al conocimiento del medio ambiente*. La Habana: Universidad para todos, 2002. p. 3-31.

LUGONES LÓPEZ, B. «Análisis de biodigestores», en *Energía y tú*, No. 22, abril-junio, 2003. p. 12-15.

PÉREZ, J. L. Y N. MAZORRA. «Biogás a partir de residuales de la Industria azucarera y destilerías de alcohol», en *Memorias II Taller Nacional de Obtención de Alimento Animal por vía Biotecnológica y Sostenible*. Ciego de Ávila: 1996. p.13.

PÉREZ, J. L.; L. RODRÍGUEZ, F. QUINTERO Y F. REYES. «Aprovechamiento de residuales como fuente de energía en una planta destiladora de alcohol

etílico», en *Resúmenes IX Seminario Científico del Centro Nacional de Investigaciones Científicas*. La Habana: 1985. p. 52.

PÉREZ, J. L.; R. C. BERMÚDEZ, P. LEZCANO Y D. RABELO. «Tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de residuales», en *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, Tomo 34, No. 2. p. 93-102, 2000.

SAHM, H. «Anaerobic Wastewater Treatment». La Habana: Seminario de Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales, 1998.

SÁNCHEZ, E.; P. WEILAND Y L. TRAVIESO. «Effect of the Organic Volumetric Rate on Soluble COD Removal on Down-Flow Anaerobic Fixed-Bed Reactors». *Bioresource Tech.* 47: 173, 1994.

SÁNCHEZ, J. V. «Biodigestores anaerobios de pequeño formato en comunidades locales de la Ciénaga de Zapata». Tesis presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Máster en Ciencias en Gestión y Conservación de los Recursos Naturales. Matanzas: Universidad de Matanzas, 2003.

SÁNCHEZ, J. V. «Producción de biogás a partir de residuales sólidos de origen animal en comunidades locales de la Ciénaga de Zapata». Ponencia presentada en el Evento Internacional «Humedales 2003». Matanzas: 2003.

SÁNCHEZ, J. V. *Introducción a la producción de biogás*. Cárdenas: Centro Cristiano de Reflexión y Diálogo y Universidad Politécnica de Madrid, 2005. 78 pp.

SANTIESTEBAN, C. M. «Los residuales como fuente de energía y Biofertilizantes en complejos agroindustriales y plantas de derivados». Informe técnico. La Habana: Instituto Cubano de Investigaciones de Derivados de la Caña de Azúcar, 1993. p. 10.

Simulación digital de la reacción de transesterificación

Digital simulation of the trans-esterification reaction

Por Ing. Armando A. Díaz García y M.Sc. José A. Sotolongo Pérez***

** Profesor Titular de la Sede Universitaria Municipal de Guantánamo, Cuba.*

*** Centro de Aplicaciones de Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible
(CATEDES),*

Guantánamo, Cuba.

Tel.: (53 21) 327861 y 326489.

e-mail: armando@catedes.gtmo.inf.cu y sotogtmo@enet.cu

Resumen

En este trabajo se exponen los fundamentos del método para la modelación matemática de la reacción de transesterificación, que es la base para la simulación de la reacción química, utilizando como herramientas la cinética de las reacciones químicas y los métodos numéricos basados en las diferencias finitas, con el objetivo de predecir la conversión de los diferentes materiales involucrados en la reacción de esterificación a diferentes temperaturas utilizando la programación en hojas Excel.

Palabras clave: Reacción de transesterificación, biodiesel

Abstract

This paper presents the fundamentals of the method for the mathematical modeling of the trans-esterification reaction, which is the base for the simulation of the chemical reaction, using the kinetics of chemical reactions and the numerical methods based on the finite differences as a tool, with the objective of predicting the conversion of the different materials involved in the reaction of esterification at different temperatures by programming using Excel spreadsheets.

Keywords: Reaction of trans-esterification, biodiesel

Introducción

La simulación es una de las herramientas más formidables de la ingeniería en el mundo de hoy; sus ventajas son innegables y el ahorro económico que se obtiene con sus aplicaciones en la ciencia y la ingeniería la convierte en una imperiosa necesidad actual. Baste decir que la simulación matemática de un proceso puede sustituir perfectamente la necesidad de construir una planta piloto, o de llevar a cabo laboriosos y costosos experimentos. Hay un viejo dicho azucarero que dice: «no basta pintar la paloma, tiene que comer», y esto lo logra la simulación mediante la modelación matemática. Al dicho se puede agregar que no solo se pone a comer a la paloma, sino que ésta hace la

digestión de lo que come y después se brinda el análisis de los resultados. Existen múltiples formas de simular matemáticamente. Se puede decir que su real significado viene dado por el hecho de establecer la posibilidad de reproducir por medio de modelos físicos, matemáticos, químicos, etc., solos o combinados, las leyes, mecanismos y relaciones entre las variables, de modo que se logre calcular, lo más exactamente posible, los resultados de un proceso cualquiera en el que intervienen diversos factores.

Fundamentos teóricos

Reacción de transesterificación

Los aceites vegetales y las grasas animales son triglicéridos (Tg), formados por tres cadenas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerina.

En la reacción de transesterificación se convierten los ésteres triglicéridos en ésteres alcalinos (biodiésel) mediante la acción de un catalizador (hidróxido de sodio o potasio) y un alcohol (normalmente metanol, para dar metilésteres).

En la reacción de transesterificación la molécula de triglicérido se divide en tres moléculas de metilester y una de glicerina. El hidróxido, actuando como un catalizador, rompe los enlaces que unen a los ácidos grasos con la glicerina, la glicerina se separa y las cadenas de ácidos grasos se unen al metanol.

En esta reacción hay tres partes (Fig. 1). Primero una cadena de ácido graso se separa del triglicérido (TG) y se une al metanol (A) formando una molécula de metilester (ME), quedando un diglicérido (Dg). Después se separa de la glicerina otra cadena de ácido graso, que se une al metanol formando la segunda molécula de metilester, dejando un monoglicérido (Mg). Finalmente el monoglicérido se convierte en metilester sustituyendo la glicerina por metanol.

Cuando termina esta última etapa se completa la reacción.

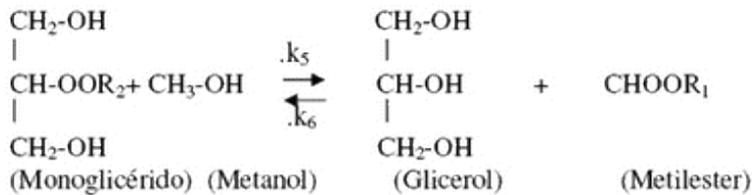
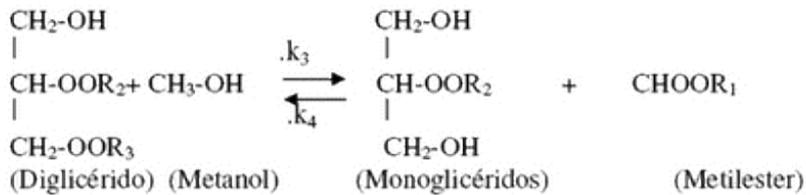
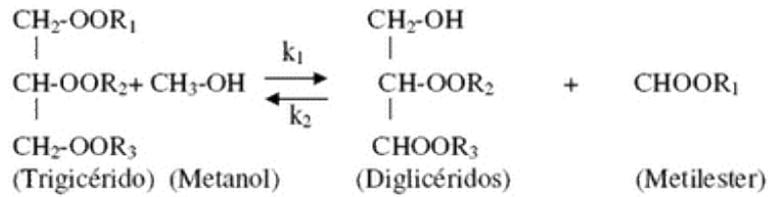


Fig. 1. Reacción de transesterificación.

Al principio la reacción es muy rápida, pero después se torna lenta. Primero la mitad de los triglicéridos se convierte en diglicéridos (después en monoglicéridos y finalmente en biodiésel), posteriormente se convierte la mitad de lo que queda, y después otra vez la mitad de lo que queda, hasta que queda una cantidad ínfima. La velocidad de la reacción disminuye progresivamente y nunca se completa del todo. Al final la cantidad de glicéridos es insignificante y cumple con los límites fijados por los estándares de calidad.

Cada una de estas reacciones es reversible con una velocidad de reacción diferente constante (k_n), haciendo notar que las reacciones en un sentido y en otro tienen lugar a velocidades diferentes.

Las reacciones son todas conocidas, de segundo orden (o pseudo-segundo orden); para expresar la velocidad de aparición y desaparición de los componentes es posible establecer una serie de ecuaciones diferenciales que se muestran en la figura 2.

$$\begin{aligned} \frac{d[TG]}{dt} &= -k_1[TG][A] + k_2[DG][E] \\ \frac{d[DG]}{dt} &= -k_3[DG][A] + k_4[MG][E] + k_1[TG][A] - k_2[DG][E] \\ \frac{d[MG]}{dt} &= -k_5[GL][E] + k_6[GL][E] + k_3[DG][A] - k_4[MG][E] \\ \frac{d[GL]}{dt} &= k_5[MG][A] - k_6[GL][E] \\ \frac{d[E]}{dt} &= k_1[TG][A] - k_2[DG][E] + k_3[DG][A] - k_4[MG][E] + k_5[MG][A] - k_6[GL][E] \\ \frac{d[A]}{dt} &= -k_1[TG][A] + k_2[DG][E] - k_3[DG][A] + k_4[MG][E] - k_5[MG][A] + k_6[GL][E] \\ \frac{d[A]}{dt} &= -\frac{d[E]}{dt} \end{aligned}$$

Fig. 2. Ecuaciones para la velocidad de reacción del proceso de transesterificación.

Donde las expresiones entre corchetes representan las concentraciones molares de los componentes siguientes:

[TG]: Triglicéridos.

[DG]: Diglicéridos.

[MG]: Monoglicéridos.

[GL]: Glicerina.

[A]: Alcohol.

[E]: Etiléster.

k_1, k_2, k_3, k_5 y k_6 : Constantes de la reacción en el sentido que se indica en la figura 1.

Desarrollo del trabajo

Solución del sistema de ecuaciones diferenciales de la cinética de la reacción de transesterificación

Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales presentadas en la figura 1 se utilizó el método numérico basado en la sustitución de las derivadas por sus equivalentes en diferencias finitas (discretización explícita) y programado su solución en hojas de programación Excel, utilizando incrementos de tiempo lo suficientemente pequeños que garanticen la convergencia de la solución y una aproximación adecuada. Los valores de las constantes de reacción fueron tomados de la literatura [Noureddini y Zhu, 1997], los cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Constantes reacción a 50 °C en (mole·min)⁻¹ para el aceite de frijol de soya

k_1	0,05
k_2	0,11
k_3	0,215

k_4	1,228
k_5	0,242
k_6	0,007

La influencia de la temperatura en las constantes de reacción fue determinada de acuerdo con la ecuación de Arrhenius:

$$k = Ae^{-E/RT}$$

$$k_{T1} = k_{T2} \text{EXP} \frac{E}{R} \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right]$$

La energía de activación E , en cal·(mole·K)⁻¹, fue tomada de Nouredini y Zhu [1997] y aparece en la tabla 2.

Tabla 2. Energía de activación, en cal·(mole·K)⁻¹

E_1	13 145
E_2	9 932
E_3	19 860
E_4	14 639
E_5	6 421
E_6	9 588

Aplicando la discretización explícita al sistema de ecuaciones mostrado en la figura 1 se obtiene:

$$\frac{TG^{P+1} - TG^P}{\Delta t} = -k_1 TG^P A^P + k_2 DG^P E^P$$

$$\frac{DG^{P+1} - DG^P}{\Delta t} = k_1 TG^P A^P - k_2 DG^P E^P - k_3 DG^P A^P + k_4 MG^P E^P$$

$$\frac{MG^{P+1} - MG^P}{\Delta t} = k_3 DG^P A^P - k_4 MG^P E^P - k_5 MG^P A^P + k_6 GL^P E^P$$

$$\frac{GL^{P+1} - GL^P}{\Delta t} = k_5 MG^P A^P - k_6 GL^P E^P$$

$$\frac{E^{P+1} - E^P}{\Delta t} = k_1 TG^P A^P - k_2 DG^P E^P + k_3 DG^P A^P - k_4 MG^P E^P + k_5 MG^P A^P - k_6 GL^P E^P$$

$$\frac{A^{P+1} - A^P}{\Delta t} = -k_1 TG^P A^P + k_2 DG^P E^P - k_3 DG^P A^P + k_4 MG^P E^P - k_5 MG^P A^P + k_6 GL^P E^P$$

En la cual el tiempo (t) viene dado por:

$$t = p \cdot \Delta t \quad (1)$$

El sistema de ecuaciones discretas puede ser escrito de la forma siguiente:

$$TG^{P+1} = (1 - k_1 \Delta t A^P) TG^P + k_2 \Delta t DG^P E^P \quad (2)$$

$$DG^{P+1} = (1 - k_2 \Delta t E^P - k_3 \Delta t A^P) DG^P + k_1 \Delta t TG^P A^P + k_4 \Delta t MG^P E^P \quad (3)$$

$$MG^{P+1} = (1 - k_4 \Delta t E^P - k_5 \Delta t A^P) MG^P + k_3 \Delta t DG^P A^P + k_6 \Delta t GL^P E^P \quad (4)$$

$$GL^{P+1} = (1 - k_6 \Delta t E^P) GL^P + k_5 \Delta t MG^P A^P \quad (5)$$

$$E^{P+1} = (1 - k_2 \Delta t DG^P - k_4 \Delta t MG^P - k_6 \Delta t GL^P) E^P + (k_1 \Delta t TG^P + k_3 \Delta t DG^P + k_5 \Delta t MG^P) A^P \quad (6)$$

$$A^{P+1} = (1 - k_1 \Delta t TG^P - k_3 \Delta t DG^P - k_5 \Delta t MG^P) A^P + (k_2 \Delta t DG^P + k_4 \Delta t MG^P + k_6 \Delta t GL^P) E^P \quad (7)$$

Se trata de un sistema de ecuaciones discretas explícito que converge siempre que se cumpla que todos los coeficientes de la ecuación sean positivos e iguales o menores que la unidad.

Análisis de los resultados

Desarrollo de la reacción

Para llevar a cabo los cálculos se tomó una concentración inicial de 6 moles de metanol por mol de triglicérido, tal como se muestra para tiempo cero en la tabla 3, utilizando un incremento de tiempo (Δt) de 2 segundos (0,033 horas), el cual garantiza la convergencia de la solución. En la tabla 3 se muestran, a manera de ejemplo, los valores de concentración de cada uno de los componentes en función del tiempo a la temperatura de 50 °C; se puede observar que la reacción ocurre rápidamente hasta aproximadamente los 2 500 segundos (0,69 horas) y que a partir de este tiempo transcurre muy lentamente. En la figura 3 se muestra el efecto de la temperatura en la obtención de metilester; se puede observar que a partir de los 50 °C el efecto es casi inapreciable.

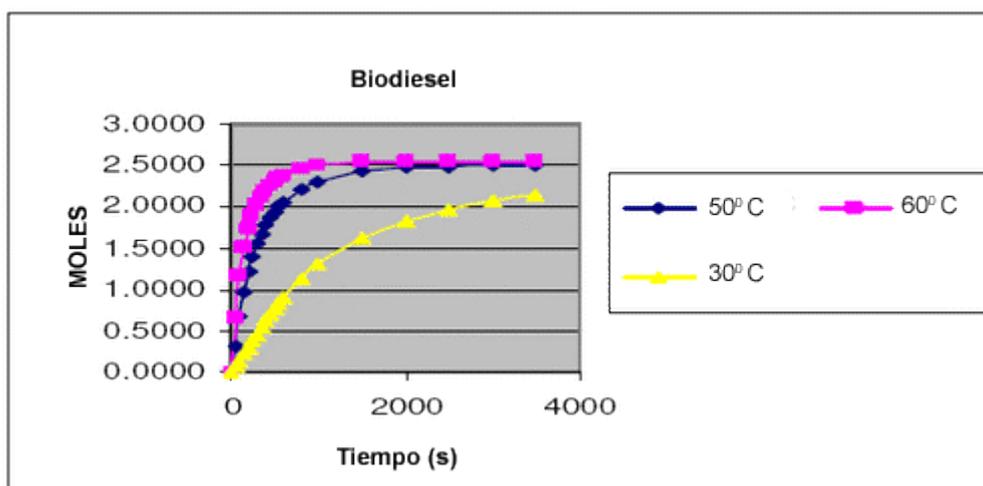


Fig. 3. Efecto de la temperatura en la obtención de metilester.

Tabla 3. Variación de la concentración de los componentes de la reacción de transesterificación con el tiempo a la temperatura de 50 °C, utilizando un Δt de 2 segundos

Tiempo, s	[TG]	[DG]	[MG]	[GL]	[E]	[A]
0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,000
50,000	0,784	0,136	0,054	0,025	0,321	5,679
100,000	0,629	0,175	0,088	0,108	0,675	5,325
150,000	0,519	0,190	0,089	0,201	0,972	5,028
200,000	0,440	0,194	0,081	0,284	1,209	4,791
250,000	0,383	0,191	0,072	0,354	1,397	4,603
300,000	0,340	0,184	0,064	0,413	1,549	4,451
350,000	0,307	0,174	0,057	0,462	1,673	4,327
400,000	0,282	0,165	0,051	0,503	1,775	4,225
450,000	0,261	0,155	0,046	0,538	1,861	4,139
500,000	0,244	0,146	0,042	0,568	1,934	4,066
550,000	0,230	0,138	0,038	0,594	1,997	4,003
600,000	0,218	0,131	0,035	0,617	2,051	3,949
800,000	0,182	0,109	0,028	0,681	2,208	3,792
1 000,000	0,160	0,095	0,024	0,721	2,306	3,694
1 500,000	0,131	0,079	0,019	0,771	2,431	3,569
2 000,000	0,119	0,073	0,018	0,790	2,480	3,520
2 500,000	0,114	0,071	0,017	0,798	2,500	3,500
3 000,000	0,111	0,070	0,017	0,802	2,500	3,500

Convergencia de la solución del sistema

Un análisis del sistema de ecuaciones discretas explícitas formado por las ecuaciones de la (2) a la (7) muestra que para que todos los coeficientes de las variables discretas sean positivos y menores de la unidad, se tiene que cumplir que:

$$1 \geq (1 - k_1 \cdot \Delta t \cdot A^P) \geq 0 \quad (8)$$

$$1 \geq (1 - k_1 \cdot \Delta t \cdot TG^P - k_3 \cdot \Delta t \cdot DG^P) \geq 0 \quad (9)$$

$$1 \geq (1 - k_4 \cdot \Delta t \cdot E^P - k_5 \cdot \Delta t \cdot IA^P) \geq 0 \quad (10)$$

$$1 \geq (1 - k_6 \cdot \Delta t \cdot E^P) \geq 0 \quad (11)$$

$$1 \geq (1 - k_2 \cdot \Delta t \cdot DG^P - k_4 \cdot \Delta t \cdot MG^P - k_6 \cdot \Delta t \cdot GL^P) \geq 0 \quad (12)$$

$$1 \geq (1 - k_1 \cdot \Delta t \cdot TG^P - k_3 \cdot \Delta t \cdot DG^P - k_5 \cdot \Delta t \cdot MG^P) \geq 0 \quad (13)$$

Teniendo en cuenta que el sistema de inecuaciones formado por las ecuaciones comprendidas de la (8) a la (13) no solo depende los valores de los incrementos, sino también de las constantes de reacción, así como de la concentración molar de los componentes, se programó el cálculo de las condiciones de convergencia y se obtuvo que para 30 °C la solución converge para valores de $\Delta t \leq 53$ segundos; para 50 °C el sistema converge para $\Delta t \leq 15$ segundos y para 60 °C, $\Delta t \leq 8$ segundos, para cualquier valor de concentración de los componentes de la reacción en el intervalo de concentraciones iniciales estudiado.

Conclusiones

El programa desarrollado en hojas Excel permite el cálculo de las variables y parámetros fundamentales de la reacción de transesterificación con suficiente aproximación, ya que es posible llevar a cabo los cálculos con intervalos de tiempo tan pequeños como se quiera. En este trabajo se usó un intervalo de tiempo de 2 segundos, el cual resulta razonablemente pequeño según los objetivos trazados, aunque pudiera haberse utilizado 0,25 segundos e inclusive mucho menor si

fuera necesario. Un análisis de las soluciones obtenidas muestra que el efecto de la temperatura en el rendimiento no es determinante, y se obtiene en el equilibrio 2,41 moles de Etilester por mol de aceite a 30 °C; 2,51 moles a 50 °C y 2,56 moles a 60 °C. El incremento de la temperatura acelera el desarrollo de la reacción, siendo efectivo hasta los 50-60 °C; por encima de estos valores los resultados que se obtendrán no difieren significativamente.

Nomenclatura y unidades

[A]: Concentración de metanol, mol.

[DG]: Concentración de diglicéridos, mol.

E: Energía de activación, cal/(mol·K).

[E]: Concentración de metilester, mol.

[GL]: Concentración de glicerina, mol.

k: Constante de velocidad de reacción, s·mol⁻¹.

[MG]: Concentración de monoglicéridos, mol.

p: Contador de intervalos de tiempo, adimensional.

t: Tiempo, s.

[TG]: Concentración de triglicéridos, mol.

Δt: Incremento de tiempo, s.

Bibliografía

BARBA, D. *Calcolo Elettronico N'ell Ingegneria Chimica*. Roma: Edición Siderca, 1971.

CARNAHAN, B.; H. A. LUTHERS Y JAMES O. WILKER. *Applied Numerical Methods*. New York: Editorial John Wiley & Sons, 1969.

DARNOKO Y D. ZHU. «Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor», *JAOCS*, vol. 77, No. 12, pp. 1263-1267, 2000.

DÍAZ, A. *Métodos numéricos aplicados*. Santiago de Cuba: Ediciones Internas, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, 2005.

———. *Métodos numéricos*. Santiago de Cuba: Ediciones Internas, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, 2003.

NOUREDDINI, H. Y D. ZHU. «Kinetics of Transesterifications of Doybean Oil», *JAOCS*, vol. 74, No. 11, pp. 1457-1461, 1997.

Estimación de emisiones de metano en vertederos sanitarios

Estimation of methane emissions from landfills

Por Saturnino F. Pire Rivas y Milvia B. González Cruz**

** Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría (CUJAE), Marianao, La Habana, Cuba.*

Tel.: (537) 2663403.

e-mail: sapiri@quimica.cujae.edu.cu

Resumen

La contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas ambientales actuales, provocando, entre otros fenómenos, por el efecto invernadero. Los vertederos sanitarios emiten diversos contaminantes a la atmósfera, fundamentalmente metano y dióxido de carbono. Las mediciones de estas emisiones resultan costosas, poco reproducibles y varían mucho con las diferentes condiciones del sitio. En el caso de la evaluación del impacto de un nuevo vertedero resulta imposible medir las emisiones y es necesario emplear modelos para estimarlas. Estos estimados son necesarios no solo para los inventarios de gases de efecto invernadero, sino también para evaluar la factibilidad económica del uso del metano como fuente de energía y la estimación de los lixiviados. En este trabajo se presenta la aplicación de dos modelos para estimar las emisiones de metano de los vertederos sanitarios. Como caso de estudio se seleccionó el mayor vertedero del país. Partiendo de estimados de los vertimientos anuales de residuos y de datos acerca de su composición, se realizan los cálculos de las emisiones de metano empleando dos de los modelos encontrados en la literatura, uno simple y el otro más complejo. Los resultados son comparados, y se observó que mediante el modelo simple se obtiene un valor de emisión de metano superior, lo que coincide con lo planteado en la literatura.

Palabras clave: Metano, vertederos sanitarios, contaminación ambiental.

Abstract

Atmospheric pollution is currently one of the most important environmental problems we have, having, among other impacts, the greenhouse effect. Landfills are sources of the emission of various atmospheric pollutants, mainly methane and carbon dioxide. The measurements of these emissions are expensive, not easily reproducible and vary depending on site conditions. In the case of the evaluation of the impact of a new landfill it is impossible to measure emissions so it is necessary to use models to make estimations. These estimations are necessary not only for inventories of greenhouse gases, but also to evaluate the economic feasibility of the use of methane as an energy resource and to estimate the lixiviation. In this paper we present the

application of two-models to evaluate the emissions of methane from sanitary landfills. As a case study it was choose the country's largest landfill. Starting from estimates of the yearly garbage discharge and data about its composition, we calculated the emissions of methane using two of the models found in the available literature, the first one simple and the second one more complex. The results were compared, and it was observed that using the simple model a higher figure of methane emission is obtained, in concordance with what is found in the literature.

Keywords: Methane, landfills, environmental pollution.

Introducción

Los vertederos de residuos sólidos generan diversos contaminantes a la atmósfera que varían dependiendo del tipo de vertedero, composición de los residuos, tiempo de vida, características del suelo, condiciones meteorológicas, como el régimen de lluvias y otras. En el caso de vertederos sanitarios las emisiones fundamentales son de dióxido de carbono y metano [Lambert, 2007; USA Enviromental..., 1997; Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1993].

Las mediciones de estas emisiones resultan costosas, poco reproducibles y varían mucho con las diferentes condiciones del sitio; en el caso de la evaluación del impacto de un nuevo vertedero resulta imposible medir y hay que estimarlas a partir de modelos teóricos [Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1993]. El estimado de las mediciones es necesario no solo para los inventarios de gases de efecto invernadero, sino que son fundamentales para poder evaluar la factibilidad económica del uso del metano como fuente de energía y la estimación de los lixiviados.

Métodos

Los modelos empleados son los reportados por las Guías de Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC) [Intergovernmental..., 2000; Intergovernmental..., 1997].

El modelo más simple sugerido en las guías (método por defecto) supone que el metano se libera en el mismo año en que los desechos se disponen en el vertedero. Esto no es lo que sucede realmente, pero proporciona una primera aproximación a las emisiones reales. También la descomposición de carbono orgánico que se deposita en los vertederos no es total y parte de éste permanece durante largo tiempo en el relleno. El metano producido, cuando no es recuperado, es emitido totalmente a la atmósfera.

El método por defecto se basa en la expresión siguiente:

$$\text{CH}_4 \text{ emitido (Gg/año)} = (\text{RSU}_F \cdot \text{FCM} \cdot \text{COD} \cdot \text{COD}_F \cdot F \cdot 16/12 - R) \cdot (1 - \text{OX}) \quad (1)$$

Donde:

RSU_F : Total de residuos sólidos municipales dispuestos en el vertedero, Gg/año.

FCM : Factor de corrección para el metano, fracción (para vertederos controlados es 1).

COD : Carbono orgánico degradable, fracción.

COD_F : Fracción de COD biodegradada.

F : Fracción de CH_4 en el gas en el vertedero (el valor por defecto es 0,5).

R : Metano recuperado, Gg/año.

OX : Factor de oxidación (metano oxidado en las capas superiores del vertedero, el valor por defecto es 0).

$$COD_{\text{fracción en peso}} = 0,4 (A) + 0,17 (B) + 0,15 (C) + 0,30 (D) \quad (2)$$

Donde:

A : Fracción en peso de los RSU que corresponden al papel y los textiles.

B : Fracción en peso de los RSU que corresponden a los desechos de jardín.

C : Fracción en peso de los RSU que corresponden a restos de alimentos.

D : Fracción en peso de los RSU que corresponden a madera y paja.

El modelo más complejo [Intergovernmental..., 2000] conocido como Descomposición de Primer Orden, First Order Decay (FOD, por sus siglas en inglés), tiene en cuenta el aporte de metano por la biodegradación de los residuos vertidos desde el año en que se comenzó a operar el vertedero hasta el año en que se desea realizar el cálculo, considerando una cinética de primer orden. Este modelo es análogo al empleado por los programas LandGEM de la EPA. La expresión matemática del modelo es la siguiente:

$$CH_4 \text{ gen en el año } t \text{ (Gg /año)} = \sum_x [(A \cdot k \cdot RSUF(x) \cdot L_0(x)) \cdot e^{-k(t-x)}] \quad (3)$$

Donde:

x : Varía desde el año inicial hasta el año de inventario t .

t : Año del inventario.

x : Años para los cuales se introducen los datos.

$A = (1 - e^{-k})/k$: Constante de normalización de la sumatoria.

$L_0(x)$: Generación potencial de metano.

$$= [FCM(x) \cdot COD(x) \cdot COD_F \cdot F \cdot 16/12] \text{ Gg } CH_4/\text{Gg de residuo} \quad (4)$$

K : Constante de velocidad de generación de metano (1/año).

$$CH_4 \text{ emitido en el año } t \text{ (Gg /año)} = [CH_4 \text{ generada en el año } t - R_{(t)}] \cdot (1 - OX) \quad (5)$$

Donde:

$R_{(t)}$: Metano recuperado en el año de inventario t, en Gg/año.

OX: Fracción de metano oxidada en las capas superiores del vertedero.

Resultados y discusión

El vertedero estudiado es el mayor del país, ubicado en las proximidades de la Calle 100 en La Habana. Este vertedero comenzó a operar en 1976. El cálculo de las emisiones se realiza para el 2005.

Los cálculos realizados por los dos modelos considerados se realizaron mediante Hoja de Cálculo en EXCEL.

La historia de los vertimientos depositados en el vertedero desde 1976 hasta el 2005 está representada en la tabla 1 y fue obtenida de la Dirección de Comunales de la provincia; los datos se tenían en volúmenes y fueron transformados a masa.

La composición de los residuos procede de datos de Caracterización de los Desechos Sólidos Comunales de Cuba, citados en informe de OPS-OMS 1997, y se reflejan en la tabla 2.

El valor de COD_F se tomó como 0,77, que es el recomendado por las guías del IPCC cuando no se dispone de otra información específica.

Para la fracción de CH_4 en el gas de vertedero F se tomó el valor recomendado por las guías de 0,5. Mediciones realizadas posteriores a este trabajo arrojan resultados promedios de 0,55.

Como no existe recuperación de metano en el vertedero, $R = 0$, y se tomó el factor de oxidación OX (metano oxidado en las capas superiores del vertedero) como 0, que es el valor sugerido por las guías, ya que no se dispone de información específica.

Tabla 1. Residuos sólidos dispuestos en el vertedero por año (Gg/año)

Año (x)	MSW
1976	156,1
1977	167,2
1978	203,9
1979	220,6
1980	252,1
1981	365,3
1982	374,4
1983	377,8
1984	400,9

1985	448,3
1986	445,9
1987	524,2
1988	521,3
1989	533,7
1990	524,2
1991	583,3
1992	413,9
1993	442
1994	448,6
1995	530,2
1996	507,9
1997	466,5
1998	491
1999	549
2000	674,2
2001	239,6
2002	227,4
2003	245,7
2004	397,8
2005	618,7
2005	618,7

A partir de los datos de composición disponibles se calcularon los valores de COD y Lo con las expresiones (2) y (4), los que se reportan en la tabla 3.

Tabla 2. Composición de los residuos (fracción en peso)

	1975-1979	1980-1983	1989
Restos de alimentos	0,472	0,373	0,488
Poda y jardín	0	0	0
Papel y textiles	0,224	0,342	0,236
Madera y paja	0,037	0,024	0,018

Tabla 3. Valores calculados para COD y Lo

	1975-79	1980-83	1989
COD	0,1715	0,2000	0,1730
Lo	0,088	0,103	0,089

Para evaluar la emisión de metano anual correspondiente al año 2005 según el modelo más simple (Método por Defecto), se toma el valor de COD para el último año en que se determinaron las composiciones (1989) y se sustituye junto a los demás valores correspondientes en la expresión (1).

El resultado obtenido es que el CH₄ emitido en el año es 54,5 Gg. Para la evaluación por el modelo más complejo (FOD), además de los valores considerados para el modelo anterior, es necesario tener en cuenta la historia de vertimientos dada en la tabla 1. Se consideran en el cálculo los valores de COD y Lo que se muestran en la tabla 3 para los períodos 1976-1979, 1980-1983 y 1984-2005. Para este último período se toman los valores correspondientes al año 1989.

La constante de generación de metano (k) está relacionada con el tiempo que tarda en descomponerse el carbono orgánico degradable (COD) presente en los residuos hasta quedar reducido a la mitad de su masa inicial (vida media o $t_{1/2}$).

$$k = \ln 2 / t_{1/2} \quad (6)$$

Respecto a la constante de generación de metano, mediciones realizadas en Estados Unidos, Reino Unido y los Países Bajos indican valores entre 0,03 y 0,2. Los valores mayores $k = 0,2$ o $t_{1/2} = 3$ años están vinculados a condiciones de elevada humedad y materiales rápidamente degradables (como los restos de alimentos). La elección del tiempo de degradación debe tener en cuenta las condiciones físicas y químicas imperantes en los vertederos, especialmente la composición química y la humedad, además deben considerarse las condiciones de manejo del vertedero [Intergovernmental..., 2000].

Observaciones realizadas en países en desarrollo de la zona tropical y subtropical indican que en los vertederos sin manejo o pobremente manejados, la mayor parte del material orgánico es más o menos degradada entre 2 y 7 años. Tomando en cuenta lo anterior se seleccionó el valor de $t_{1/2} = 7$ años, lo que arroja un valor aproximado de $k = 0,1$ (1/año). Los cálculos se realizan según la expresión (5), empleando una Hoja de Cálculo EXCEL.

El resultado obtenido es que el CH₄ emitido en el año es de 37,3 Gg. Como se puede observar, el valor obtenido por el modelo complejo FOD es bastante inferior al obtenido por el modelo simple (por defecto).

El modelo FOD se aproxima más al fenómeno que sucede en el vertedero, sin embargo las incertidumbres en los valores de L_0 y k pueden producir que los valores obtenidos se alejen de los reales.

Otras incertidumbres son la estimación de las masas de residuos vertidos y la densidad que se emplea para transformar los volúmenes en masa, estas dos últimas afectan por igual a los dos modelos en el año de inventario. La falta de información confiable sobre las composiciones de los residuos también afecta por igual la precisión de ambos modelos.

Conclusiones

1. El valor de emisión obtenido mediante el modelo más simple (Método por Defecto) es superior al obtenido mediante el modelo más complejo (FOD).
2. Los resultados del modelo FOD se acercan más a las emisiones reales, esto se basa en comparaciones con mediciones experimentales reportadas en otros trabajos [Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1993; Intergovernmental..., 2000], pero implica disponer de una mayor cantidad de información, no siempre disponible. Las suposiciones respecto a las informaciones no disponibles son fuente de incertidumbres.
3. El presente trabajo constituye un estudio metodológico preliminar en la temática de las emisiones y sirve como fuente de información para estudios posteriores referentes a este tema.
4. La realización de este trabajo evidencia la necesidad de trabajos experimentales en el campo de los residuos sólidos municipales para obtener composiciones y densidades promedios de estos, que junto a otras informaciones son necesarias en los modelos para poder tener mejores estimados de las emisiones de metano con diferentes objetivos.

Bibliografía

- LAMBERT, OTTEN. *Landfill Design Issues*. Short Course on SWM. La Habana: ISPJAE, 2007.
- USA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Municipal Solid Waste Landfills. Emission Factor Documentation for AP-42. Section 2.4*. 1997.
- TCHOBANOGLIOUS, GEORGE; HILARY THEISEN AND SAMUEL A. VIGIL. *Integrated Solid Waste Management-Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC-OECD-IEA. París: 2000.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3. Reference Manual*. IPCC-OECD-IEA. París: 1997.

Influencia del biodiésel sobre la calidad del combustible diésel

Influence of biodiesel on the quality of diesel

Por D. G. Chenard*, T. N. Om*, C. Y. Reyes*, R. L. Pérez* y V. Loginopoulo*

* Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba.

e-mail: gisemarina@yahoo.es

Resumen

Como una alternativa opcional de energía se han dirigido los esfuerzos hacia el desarrollo de la producción de biodiésel, en países como Cuba que no posee grandes reservas de petróleo y debe importar crudos y sus derivados para satisfacer las crecientes demandas de energía y elevados precios. En el trabajo, realizado en el laboratorio GreenTec de la Escuela de Química/UFRJ, Brasil, se evalúan los biodiésel obtenidos por transesterificación básica, a partir del aceite de la *Jatropha curcas* Lin., y opcionalmente del aceite de *Ricinus communis* Lin. mezclado en 20% (por su elevada viscosidad) con la *Jatropha curcas*, cumpliendo ambos con las especificaciones de calidad establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 42/2004. Los resultados por cromatografía gaseosa (GC) demuestran que en el proceso de obtención de ambos biodiésel se logró la conversión de 82,52 y 74,84%, respectivamente, separación de la glicerina de 99,9%, recuperación del alcohol de 100% y total purificación en la eliminación del catalizador. También se estudió la influencia del biodiésel en el combustible diésel mediante diferentes porcentajes de mezclas diésel-biodiésel, donde es positiva porque disminuye proporcionalmente el contenido de azufre total y aumenta ligeramente la acidez, aunque cumple con las especificaciones.

Palabras clave: Diésel, biodiésel, biocombustible, *Jatropha curcas*, *Ricinus communis*.

Abstract

There have been efforts toward the development of the production of biodiesel as an energy alternative, specifically in countries like Cuba that does not have big oil reserves and that should import crude oil and derivatives to meet the increasing energy demand of increasing prices. The paper describes the research carried out at the GreenTec laboratory of the School of Chemistry UFRJ, Brazil, where we evaluated the biodiesel obtained by basic trans-esterification, from *Jatropha curcas* Lin oil, and optionally from *Ricinus communis* Lin oil mixed (due to its high viscosity) with 20 % of *Jatropha curcas*, both accomplishing with the quality specifications established by the National Agency of Oil, Natural Gas and Biofuels Resolution ANP No. 42/2004. The results obtained by gas chromatography (GC) demonstrated that in the process of obtaining of both biodiesel it was achieved an 82.52% and 74.84% conversion, respectively, glycerine separation of 99.9%, alcohol recovery of 100%

and total purification in the elimination of the catalyst. Also we studied the influence of biodiesel in diesel fuel by means of different percentages of mixtures diesel-biodiesel, which is positive because it proportionally decreases the content of total sulphur and lightly increases acidity, although it meets the specifications.

Keywords: Diesel, biodiesel, biofuel, *Jatropha curcas*, *Ricinus communis*.

Introducción

El problema energético en la actualidad es considerado uno de los más graves fundamentalmente para los países del tercer mundo, debido a que la mayoría de los productos utilizados como energéticos provienen de recursos naturales fósiles, no renovables (carbón, petróleo y sus derivados). La agricultura es una de las fuentes potenciales de aporte de energía con posibilidades de ser transformadas, en breve plazo, para obtener materiales que se utilicen como componentes, en mezclas, con los combustibles líquidos derivados del petróleo [Pérez, et al, 2008; Foidl y Eder, y ECOÓLEO].

La biomasa puede ser generada desde varias fuentes y puede ser convertida en combustibles gaseosos y líquidos. Los biocombustibles más importantes generados de la biomasa son el biodiésel y el bioetanol. Como una alternativa opcional de energía se han dirigido los esfuerzos hacia el desarrollo de la producción de biodiésel, en países como Cuba que no es rica en reservas de petróleo y debe importar crudos y sus derivados para satisfacer las crecientes demandas de energía y elevados precios [Santo, 2005, y Ma y Hanna, 1999].

El biodiésel es producido a partir de aceites vegetales vírgenes, tanto comestibles como no comestibles, y de grasas animales a través de procesos químicos, de los cuales el más generalizado es la transesterificación. Las propiedades físicas y químicas de los ésteres así obtenidos son similares y a veces superiores a las de los combustibles diésel minerales. En consecuencia, los referidos ésteres generalmente son denominados biodiésel.

El siguiente trabajo, realizado en el laboratorio GreenTec de la Escuela de Química/UFRJ. Brasil, evalúa el biodiésel obtenido del aceite de la *Jatropha curcas* Lin. [Zamora, et al., y Pérez, et al.] (comúnmente llamado piñón de botija), por ser entre las diferentes plantas oleaginosas la de mayor facilidad de siembra, cultivo, mantenimiento, altos rendimientos, etc., y opcionalmente a partir del aceite de *Ricinus communis* Lin. (higuereta) mezclado en 20% (por su elevada viscosidad) con la *Jatropha curcas*.

Además, estudia la influencia del biodiésel sobre la calidad del diésel en diferentes porcentajes de mezclas diésel-biodiésel, cumpliendo con las especificaciones establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles-ANP [Especificaciones..., 2001, y Especificaciones..., 2004].

Objetivos

- Obtención de biodiésel a partir de aceites de *Jatropha curcas* Lin. y *Ricinus communis* Lin.
- Estudiar la influencia del biodiésel sobre la calidad del diésel al ser mezclados en diferentes concentraciones.

Materiales y métodos

Materias primas

- Aceite de *Jatropha curcas* Lin. (piñón de botija), cedido por el Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible (CATEDES), de San Antonio del Sur, Guantánamo Cuba.
- Aceite de *Ricinus communis* Lin. (higuereta), donada por la Gerencia de Biocombustibles del Centro de Investigaciones del Petróleo de la PETROBRAS (CENPES).
- El metanol con pureza de 99,9%, suministrado por la firma Prosint.
- Hidróxido de potasio (p/a) como catalizador para realizar la reacción de transesterificación, suministrado por la compañía CBMM S.A.
- Diésel brasileño: Diésel automotor S-500, cumple con las especificaciones de calidad establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 310, de 27.12.2001.DOU 28.12.2001 (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Especificaciones de calidad del diésel S-500

Características	Unidades	Límites			Métodos	
		S-500	Metropolitano	Interior	ABNT NBR	ASTM D
Aspecto		Limpio y libre de impurezas			Visual (1)	
Color ASTM, máx.		3,0	3,0	3,0 (2) (3)	14 483	1 500
Azufre total, máx.	ppm	500	2,000	3,500	14 815, 14 533	1 552, 2 622, 4 294, 5 453
Destilación	°C				9 619	86
50 vol., recuperado, máx.		245,0-310,0				
85% vol., recuperado, máx.		360,0	360,0	370,0		
Densidad a 20 °C	kg/m ³	820 a 865	820 a 865	820 a 880	7 148, 14 065	1 298, 4 052
Punto de inflamación, min.	°C	38,0			7 974, 14 598	56, 93, 3 828

Viscosidad a 40 °C	(mm ² /s) cSt	2,5 a 5,5	10 441	445
Punto de ensuciamiento del filtro	°C	(4)	14 747	6 371
Número de cetano, mín. (5)	-	42	-	613
Residuo de carbón Ramsbottom en el residuo de 10% final de la destilación, máx.	% masa	0,25	14 318	524
Cenizas, máx.	% masa	0,020	9 842	482
Corrosión lámina de Cu 3h 100 °C	-	1	14 359	130
Agua y sedimentos, máx.	% volumen	0,05	14 647	1 796

Notas:

- (1) La visualización será realizada en probeta de vidrio, conforme la utilizada en el método NBR 7148 o ASTM D 1298.
- (2) Límite requerido antes de la adición de colorante. El colorante rojo deberá ser adicionado en una concentración de 20 mg/L por las refinerías centrales de materias primas, petroquímicas, importadoras y distribuidoras.
- (3) Las refinerías, centrales de materias primas, petroquímica, importadoras y distribuidoras de combustible diésel automotor deberán atender las exigencias referentes a la adición de colorante a partir de 01/01/2003.
- (4) Limite conforme tabla 2.
- (5) Alternativa al ensayo de Número de cetano; queda permitida la determinación del Índice de cetano calculado por el método NBR 14759 (ASTM D 4737), con valor mínimo de 45. En caso de desacuerdo de resultados, prevalecerá el valor de Número de cetano.

Tabla 2. Punto de ensuciamiento del filtro en frío del diésel S-500

Unidades de la federación	Límites máximos °C											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
SP-MG-MS	12	12	12	7	3	3	3	3	7	9	9	12
GO/DF-MT-ES-RJ	12	12	12	10	5	5	5	8	8	10	12	12
PR-SC-RS	10	10	7	7	0	0	0	0	0	7	7	10

Metodología experimental

Caracterización físico-química de los aceites

Las muestras de aceites de piñón de botija e higuera se caracterizaron en el Laboratorio de Tecnologías Verdes (GreenTec), Escuela de Química, Universidad Federal de Río de Janeiro, según las normas establecidas internacionalmente.

Obtención de biodiésel

Durante la optimización del proceso de transesterificación de los aceites vegetales fueron evaluados los parámetros de salida siguientes:

- Rendimiento (mínimo 92).
- Viscosidad.
- Contenido de ésteres.
- Glicerol Total (máximo 0,38%).
- Acidez (máximo 1%).
- Conversión.:

Donde:

Ésteres totales = masa de éster / masa de biodiésel.

Rendimiento = masa de biodiésel / masa de aceite.

Conversión = $(1 - \text{Glicerol total}/gmt) \cdot 100$.

gmt: Porcentaje del radical glicerol en la molécula de triglicérido, se considera aproximadamente 10,5%.

Los catalizadores más utilizados en la catálisis básica son bases fuertes como NaOH, KOH, carbonatos y metóxidos, etóxidos, y en menor grado, propóxidos y butóxidos de sodio y potasio. El catalizador hidróxido de potasio se seleccionó para realizar la reacción de transesterificación, teniendo en cuenta el alto rendimiento obtenido en estudios anteriores y la relación efectividad/costo.

Reacción de transesterificación básica

Los experimentos fueron realizados en el laboratorio GreenTec de la Escuela de Química/UFRJ, Brasil, en un reactor tipo autoclave PARR 4842 (Parr Instrument, Inc.), de acero inoxidable, con volumen útil de 300 mL y presión máxima de trabajo de 10.000 psi (Fig. 1). El reactor posee agitación y manta externa para calentamiento. También posee un tomamuestras, controlador de temperatura y presión.

La agitación fue constante. En la reacción fueron utilizadas las condiciones siguientes: temperatura ambiente, 300 g de aceite, razón molar metanol/aceite de 9 y 0,8% de catalizador. Al finalizar la reacción, la mezcla producto fue lavada una vez con solución de ácido cítrico, para neutralizar el catalizador básico, y posteriormente lavada con agua dos

veces. Finalmente se realizó la etapa de secado, donde se eliminan el metanol y el agua.



Fig. 1. Reactor PARR 4842.

Ambos biodiésel deben cumplir con las especificaciones de calidad establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 42/2004 (Tabla 3).

Tabla 3. Especificación de biodiésel-B100. Resolución ANP No. 42/2004

Características	Unidades	Límites	Método		
			ABNT NBR	ASTM D	ISO
Densidad a 20 °C	kg/m ³	Anotar (5)	7 148, 14 065	1 298	-
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	Anotar (1)	10 441	445	EN ISO 3104
Agua y sedimentos, máx.	% v/v	0,05	-	2 709	-
Punto de inflamación, mín.	°C	100	14 598	93	ISO/CD 3679
Destilación; 90% vol. recuperado, máx.	°C	360 (4)	-	1 160	-
Carbon conradson, máx.	% m/m	0,10	-	189	EN ISSO 10370
Cenizas sulfatadas, máx.	% m/m	0,020	9 842	874	ISO 3987
Azufre total, máx.	% m/m	0,05	-	5 453	EN ISO 14596
Sodio + potasio, máx.	mg/kg	10	-	-	EN 14108 EN 14109
Calcio + magnesio, máx	mg/kg	Anotar	-	-	EN 14538
Fósforo	mg/kg	Anotar	-	4 951	EN 14107

Corrosión a cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14 359	130	EN ISSO 2160
Número de cetano	-	Anotar	-	613	EN ISSO 5165
Acidez, máx.	mg KOH/g	0,8	14 448	664	EN 14104
Índice de iodo	g de iodo/100 g	Anotar	-	-	EN 14111
Concentración de éster	% m/m	Anotar	-	-	EN 14103
Glicerina libre, máx.	% m/m	0,02	-	6 584	EN 14105 EN 14106
Glicerina total, máx.	% m/m	0,38	-	6 584	EN 14105
Monoglicéridos	% m/m	Anotar	-	6 584	EN 14105
Diglicéridos	% masa	Anotar	-	6 584	EN 14105
Triglicéridos	% m/m	Anotar	-	6 584	EN 14105
Metanol o etanol, máx.	% m/m	0,5	-	-	EN 14110
Estabilidad a la oxidación a 110 °C, mín.	h	6	-	-	EN 14112

Notas:

(1) La mezcla de diésel/biodiésel utilizada deberá obedecer a los límites establecidos para la viscosidad a 40 °C constantes de la especificación vigente de la ANP para diésel automotor.

(2) La mezcla de diésel/biodiésel utilizada deberá obedecer a los límites establecidos para el punto de obstrucción del filtro constante de la especificación vigente de la ANP para diésel automotor.

(3) LII. Limpio y libre de impurezas.

(4) Temperatura equivalente a la presión atmosférica.

(5) La mezcla de diésel/biodiésel utilizada deberá obedecer a los límites establecidos para la densidad a 20 °C constantes de la especificación vigente de la ANP para diésel automotor.

Cromatografía Gaseosa (GC)

Las muestras de biodiésel fueron analizadas a través de la cromatografía gaseosa (GC), utilizando un cromatógrafo (Fig. 2) del tipo Shimatzu modelo GC2010, con detector de ionización de llama (Flame Ionization Detector, FID). Se emplearon varios métodos para determinar la calidad de ambos biodiésel, en cuanto a conversión, separación, recuperación y purificación, tales como:

- Composición de radicales grasos (concentración de éster): Válido para análisis del porcentaje de los metil éster de ácidos grasos, presentes en el biodiésel entre C14 y C24, de acuerdo con patrones internos.
- Contenido de mono-di-triglicéridos y glicerol libre: Consiste en la transformación de glicerol y glicéridos en derivados silanizados más volátiles en presencia de piridina y N-metil-N-trimetilsililtrifluoroacetmida (MSTFA). La determinación de glicerol libre y total, indica el contenido de glicerol no ligado y ligado

presente en el combustible. Un alto contenido de glicerol libre puede causar depósitos en el inyector y en los sistemas de abastecimiento y almacenamiento, bajas concentraciones de glicerol total, así como de mono-di y triglicéridos indican casos de bajas conversiones, lo que puede causar depósitos en el inyector.

- Concentración de metanol o etanol: Aplicable a cualquier biodiésel, determina el porcentaje de metanol o etanol en el biodiésel.



Fig. 2. Cromatógrafo GC Shimadzu, modelo GC2010.

Formulación de las mezclas

A partir del diésel S-500 y los biodiésel obtenidos, se formularon diferentes mezclas a las concentraciones de 2, 5 y 8%, teniendo en cuenta que mayores porcentajes no se prevén para un futuro cercano:

1. Combustible diésel S-500 + 2% biodiésel de piñón de botija.
2. Combustible diésel S-500 + 5% biodiésel de piñón de botija.
3. Combustible diésel S-500 + 8% biodiésel de piñón de botija.
4. Combustible diésel S-500 + 2% biodiésel de (80% piñón de botija + 20% higuera).
5. Combustible diésel S-500 + 5% biodiésel de (80% piñón de botija + 20% higuera).
6. Combustible diésel S-500 + 8% biodiésel de (80% piñón de botija + 20% higuera).

La caracterización físico-química de las mezclas relacionadas se realizó en el Laboratorio GreenTec, usando los métodos establecidos, para el diésel y para los biodiésel (Tablas 1 y 3).

Resultados y discusión

Caracterización de las materias primas

Las características físico-químicas de los aceites de piñón de botija e higuera se muestran en las tablas 4 y 5, respectivamente.

Tabla 4. Características físico-químicas del aceite de piñón de botija

Características	Norma	Aceite de piñón de botija
Índice de acidez, mgKOH/g	ASTM D-664	0,96
Densidad a 20 °C, kg/m ³	ASTM D-1298	914,9
Índice de refracción a 25 °C	ASTM D1218	1,4680
Índice de saponificación	ASTM D-94	189,0
Índice de iodo, g de iodo/100 g	EN 14111	97,0
Insaponificables, %	ASMT D-1065	1
Índice de peróxido, meq/1 000 g	ISO 3960	10,0
Punto de solidificación, °C	D-97	< -10,0
Color ASTM	ASTM D-1500	1
Cenizas, %	ABNT NBR 9842	< 0,1
Poder calórico superior, kcal/kg		9,855
Viscosidad a 37,8 °C, cSt	ASTM D-445	31,5
Composición en radicales grasos C16:0 Ac Palmítico C18:0 Ac Esteárico C18:1 Ac Oleico C18:2 Ac Linoléico C18:3 Ac. Linolénico Otros	EN 14103	17,01 7,5 39,1 34,5 0,6 -

Tabla 5. Características físico-químicas del aceite de higuera

Características	Norma	Aceite de higuera
Índice de acidez, mgKOH/g	ASTM D-664	0,247
Densidad a 20 °C, kg/m ³	ASTM D-1298	960
Índice de refracción a 25 °C	ASTM D1218	1,4770
Índice de saponificación	ASTM D-94	143,0
Índice de peróxido, meq/1 000 g	ISO 3960	0,10
Índice de iodo, g de iodo/100 g	EN 14111	92,00
Punto de solidificación, °C	D-97	< -10,0
Color ASTM	ASTM D-1500	2
Viscosidad a 37,8 °C, cSt	ASTM D-445	285
Corrosión a Cobre, 3h a 50 °C	ASTM D-130	No se observa
Destilación, °C PIE 50 85 PFE	ASTM D 86	97,50 254,30 273,20 297,00

Composición en radicales grasos		
Ac Ricinoléico		89,2
Ac Palmítico		1,0
Ac Esteárico		1,0
Ac Oleico	EN 14103	3,0
Ac Linoléico		4,2
Ac. Linolénico		0,6
Ac Dihidroxiesteárico		0,7
Ac Eicosanóico		0,3

Como puede observarse en la tabla 4, el aceite de piñón de botija está constituido principalmente por triglicéridos con radicales de ácidos oléico, linoléico y palmítico. Presenta baja acidez, cumpliendo con lo establecido por normas internacionales para la transesterificación básica que es de 1 mgKOH/g. En el caso del aceite de higuera (Tabla 5) está constituido fundamentalmente por radicales de ricinoleico y una acidez mucho menor.

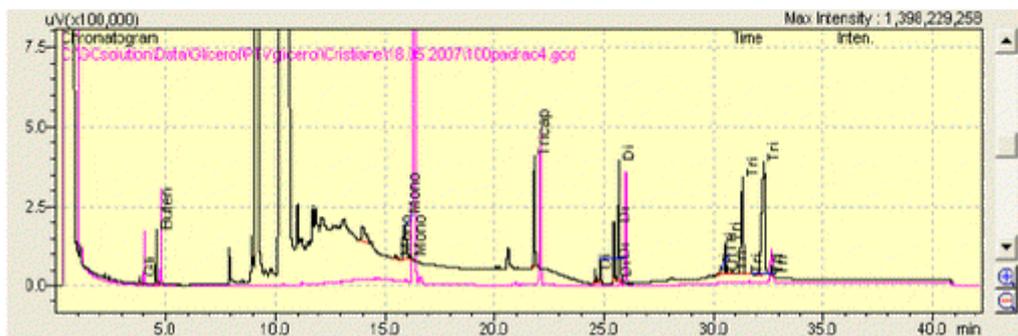
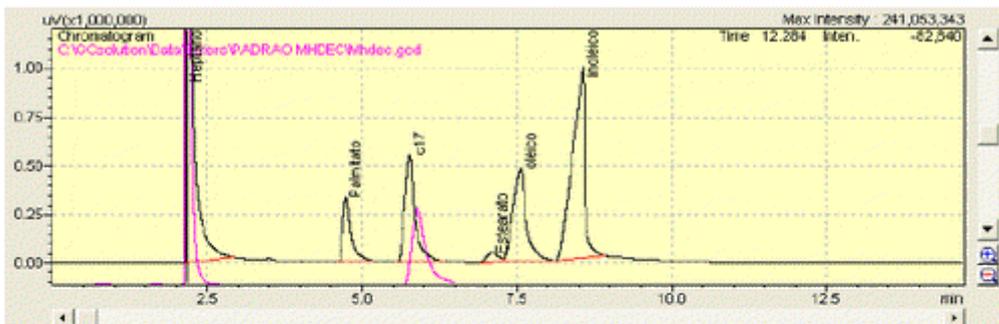
Elevada acidez en la materia prima favorece la reacción de saponificación, se forman emulsiones y jabones durante el tratamiento, disminuyen considerablemente el rendimiento de la reacción y torna más demoradas las etapas de separación, recuperación y purificación de los productos.

La caracterización físico-químicas de las muestras de biodiésel que se obtuvieron a partir de los aceites antes mencionados, se presenta en la tabla 6; además, en las figuras 3 y 4 se muestran los cromatogramas obtenidos por GC, del análisis de la composición de radicales grasos (concentración de éster), contenido de mono-di-triglicéridos, glicerol libre y alcohol, métodos mediante los cuales se determina la calidad del producto en cuanto a conversión, separación, recuperación y purificación.

Tabla 6. Caracterización físico-química de las muestras de biodiésel

Característica	Método	Especificación biodiésel B-100 ANP No. 42/2004	Biodiésel de piñón de botija	Biodiésel de (80% piñón de botija + 20% higuera)
Densidad a 20 °C, kg/m ³	ASTM-D 1298 NBR 7148	Anotar	878,8	888
Viscosidad a 40 °C, mm ² /s	ASTM-D 445 NBR 10441	Anotar	4,327	8,45
Agua y sedimentos, % v/v	ASTM-D 2709	0,05 máx.	0	0
Punto de inflamación, °C	ASTM-D 93 NBR 14598	100 mín.	130	152
Carbón conradson, % m/m	ASTM-D 189	0,10 máx.	0,05	0,07
Cenizas sulfatadas, % m/m	ASTM-D 874 ISO 3987	0,020 máx.	0,0058	0,0079

Azufre total, % m/m	ASTM-D 5453	0,05 máx.	0	0
Sodio + potasio, mg/kg	EN 14108 EN 14109	10 máx.	7,6	9,6
Corrosión a cobre, 3h a 50 °C	ASTM-D 130	1 máx.	1 a	1 a
Número de cetano	ASTM-D 613	Anotar	50,2	52
Acidez, mg KOH/g	ASTM-D 664 NBR 14448	0,8 máx.	0,71	0,60
Índice de yodo, g de yodo/100 g	EN 14111	Anotar	89,4	82,0
Concentración de éster, % m/m	EN 14103	Anotar	82,52	74,84
Glicerina libre, % m/m	ASTM-D 6584 EN 14105 EN 14106	0,02 máx.	0,01	0,001
Glicerina total, % m/m	ASTM-D 6584 EN 14105	0,38 máx.	0,36	0,26
Monoglicéridos, % m/m	ASTM-D 6584 EN 14105	Anotar	0,37	0,48
Diglicéridos, % m/m	ASTM-D 6584 EN 14105	Anotar	1,23	0,48
Triglicéridos, % m/m	ASTM-D 6584 EN 14105	Anotar	4,77	0,65
Metanol o etanol, % m/m	EN 14110	0,5 máx.	0,00	0,05
Estabilidad a la oxidación a 110 °C, h	EN 14112	6 mín.	10,6	8,8
Fósforo, mg/kg	ASTM-D 4951 EN 14107	Anotar	<5,0	<5,0



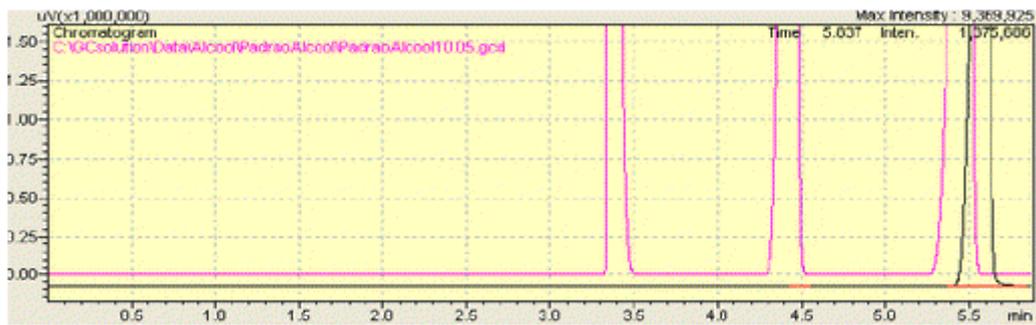


Fig. 3. Cromatogramas usados para determinar la concentración de éster, mono-di-triglicéridos, glicerol libre y alcohol en el biodiésel de piñón de botija.

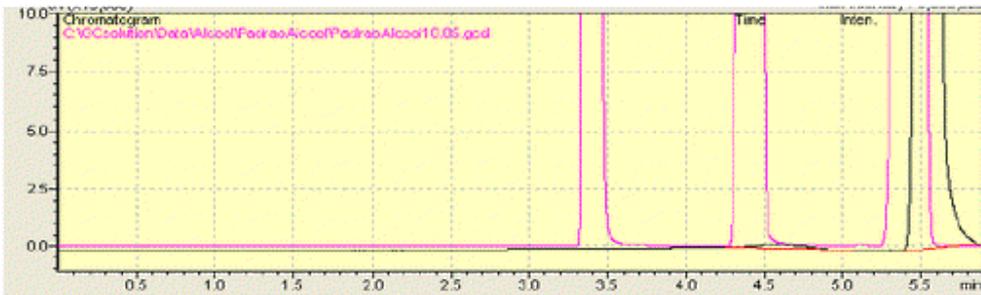
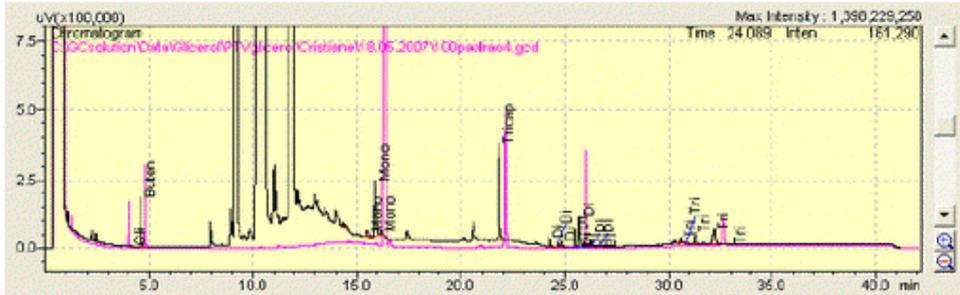
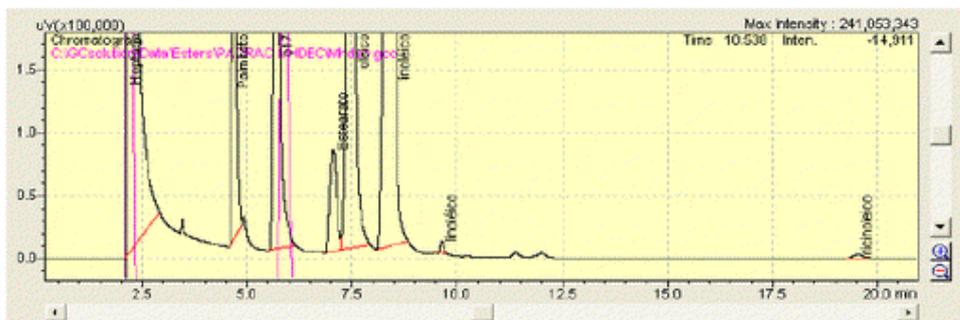


Fig. 4. Cromatogramas usados para determinar la concentración de éster, mono-di-triglicéridos, glicerol libre y alcohol en el biodiésel de higuera.

Como se puede observar en las tablas 4, 5 y 6, la viscosidad de los biodiésel de piñón de botija y la mezcla 80:20 (piñón: higuera) es significativamente menor en relación con la viscosidad de los aceites

originales. En el caso de la mezcla 80:20 el valor de la viscosidad es el doble del biodiésel de piñón de botija.

Del análisis de los cromatogramas (Figs. 3 y 4) y la tabla 6, se puede señalar que para ambos biodiésel se logró: conversión de 82,52 y 74,84%, respectivamente, separación de la glicerina 99,9%, recuperación del alcohol 100% y total purificación en la eliminación del catalizador; además, cumplen con las especificaciones de calidad establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 42/2004.

La caracterización físico-química del combustible diésel S-500 se presenta en la tabla 7, donde se muestra que este combustible cumple con las especificaciones de calidad establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 310, de 27.12.2001. DOU 28.12.2001.

Tabla 7. Caracterización físico-química del combustible diésel S-500

Características	Método	Especificación	Diésel S-500
Densidad a 15 °C, kg/m ³	ASTM D-1298	820-865	835
Corrosión en láminas de cobre, 3h a 50 °C	ASTM D-130	1 máx.	1 b
Azufre total, % m/m	ASTM D-4294 NBR-14553	0,05 máx.	0,0388
Índice de acidez, mg KOH/g	ASTM D-974	-	0,028
Viscosidad a 40 °C, mm ² /s	ASTM D-445	2,5-5,5	2,8619
Color ASTM	ASTM D-1500	3,0 máx.	1,0
Punto de inflamación, °C	ASTM D-93	38 mín.	122
Agua y sedimentos, % v/v	ASTM D-96	0,05 máx.	Ausencia
Número de cetano	ASTM D-613	42 máx.	48,4
Carbón Conradson, % m/m	ASTM D-189	0,05 máx.	0,02
Cenizas, % m/m	ASTM D-482	0,02 máx.	0

Destilación, °C			
PIE			217,0
5			241,5
10			253,5
20			267,5
30			277,0
40			286,0
50			295,5
60	ASTM D-86	245-310	306,5
70			319,0
80			335,0
90			362,0
95			385,0
PFE			388,0
% recobrado			98,0
% pérdida			1,0
% residuo			1,0

Caracterización de las mezclas

Los resultados de la caracterización físico-química de las mezclas de combustible diésel con diferentes concentraciones (2, 5 y 8%) de biodiésel de piñón de botija, se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Caracterización físico-química de de las mezclas de combustible diésel con diferentes concentraciones de biodiésel de piñón de botija

Característica	Método	Especificación diésel S-500	Combustible diésel S-500 + 2% biodiésel de piñón de botija	Combustible diésel S-500 + 5% biodiésel de piñón de botija	Combustible diésel S-500 + 8% biodiésel de piñón de botija
Densidad a 15 °C, kg/m ³	ASTM D-1298	820-865	836	838	839
Corrosión en láminas de cobre, 3h a 50 °C	ASTM D-130	1 máx.	1b	1b	1b
Azufre total, % m/m	ASTM D-4294 NBR-14553	0,05 máx.	0,0380	0,0369	0,0357
Índice de acidez, mg KOH/g	ASTM D-974	-	0,048	0,052	0,055

Viscosidad a 40 °C, mm ² /s	ASTM D-445	2,5-5,5	2,92	2,95	2,97
Color ASTM	ASTM D-1500	3,0 máx.	1	1	1
Punto de inflamación, °C	ASTM D-93	38 mín.	123	127	129
Agua y sedimentos, % v/v	ASTM D-96	0,05 máx.	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Número de cetano	ASTM D-613	42 máx.	-	-	49,3
Carbón Conradson, % m/m	ASTM D-189	0,05 máx.	0,020	0,021	0,021
Cenizas, % m/m	ASTM D-482	0,02 máx.	0,00030	0,00030	0,00034
Punto de ensuciamiento del filtro en frío, °C	CFPP	Tabla 2	-8	-8	-8
Destilación, °C	ASTM D-86	245-310	170	170	172
PIE			200	200	180
5			210	210	210
10			225	225	220
20			230	235	230
30			250	252	250
40			260	262	270
50			275	280	290
60			290	303	300
70			315	318	320
80			340	343	340
90			345	345	345
PFE			98,0	98,0	98,0
% recobrado			1,0	1,0	1,0
% pérdida	1,0	1,0	1,0		
% residuo					

Los resultados de la caracterización físico-química de las mezclas de combustible diésel con diferentes concentraciones de biodiésel de (80% piñón de botija + 20% higuera), se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Caracterización físico-química de de las mezclas de combustible diésel con diferentes concentraciones de biodiésel (80% piñón de botija + 20% higuera)

Característica	Método	Especificación diésel S-500	Combustible diésel S-500 + 2% biodiésel (80% piñón de botija + 20% higuera)	Combustible diésel S-500 + 5% biodiésel (80% piñón de botija + 20% higuera)	Combustible diésel S-500 + 8% biodiésel (80% piñón de botija + 20% higuera)
Densidad a 15 °C, kg/m ³	ASTM D-1298	0,820-0,865	836	838	839
Corrosión en láminas de cobre, 3h a 50 °C	ASTM D-130	1 máx.	1b	1b	1b
Azufre total, % m/m	ASTM D-4294 NBR-14553	0,05 máx.	0,0380	0,0369	0,0357
Índice de acidez, mg KOH/g	ASTM D-974	-	0,043	0,047	0,048
Viscosidad a 40 °C, mm ² /s	ASTM D-445	2,5-5,5	2,96	3,25	3,46
Color ASTM	ASTM D-1500	3,0 máx.	1	1	1
Punto de inflamación, °C	ASTM D-93	38 mín.	128	132	136
Agua y sedimentos, % v/v	ASTM D-96	0,05 máx.	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Número de cetano	ASTM D-613	42 máx.	-	-	49,9

Carbón conradson, % m/m	ASTM D-189	0,05 máx.	0,022	0,023	0,023
Cenizas, % m/m	ASTM D-482	0,02 máx.	0,00060	0,00064	0,00070
Punto de ensuciamiento del filtro en frío, °C	CFPP	Tabla 3.2	-8	-8	-8
Destilación, °C					
PIE			170	170	170
5			200	200	198
10			210	210	208
20			220	220	220
30			235	237	240
40			247	250	255
50	ASTM D-86	245-310	260	265	270
60			275	280	282
70			290	298	300
80			310	312	318
90			332	340	335
PFE			343	345	344
% recobrado			98.0	98.0	98.0
% pérdida			1,0	1,0	1,0
% residuo			1,0	1,0	1,0

Los resultados de las diferentes mezclas con sendos biodiésel (Tablas 8 y 9) muestran que el incremento del porcentaje de biodiésel en el diésel, tiene una influencia positiva, disminuyendo proporcionalmente el contenido de azufre total y negativa aunque dentro de las especificaciones al aumentar ligeramente la acidez.

Conclusiones

1. Las muestras de aceite de piñón de botija e higuera, empleadas en el presente estudio, cumplen con las especificaciones para la obtención de biodiésel por transesterificación básica, exceptuando la elevada viscosidad en el aceite de higuera, por lo que se decidió a partir de trabajos anteriores utilizarlo en 20% con el biodiésel de piñón de botija.
2. Los biodiésel obtenidos a partir de aceites de piñón de botija y la mezcla 80:20 (piñón: higuera) cumplen con las especificaciones de calidad establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 42/2004.
3. De acuerdo con los resultados obtenidos, la viscosidad del biodiésel de piñón de botija y la mezcla 80:20 (piñón: higuera) es significativamente menor en relación con la viscosidad de los aceites originales. En el caso de la mezcla 80:20 el valor de la viscosidad es el doble del biodiésel de piñón de botija.
4. Del análisis de los cromatogramas, para ambos biodiésel, se logró: conversión de 82,52 y 74,84%, respectivamente, separación de la glicerina de 99,9%, recuperación del alcohol de 100% y total purificación en la eliminación del catalizador.

5. Las diferentes mezclas con sendos biodiésel muestran que el incremento del porcentaje de biodiésel en el diésel, tiene una influencia positiva, disminuyendo proporcionalmente el contenido de azufre total y aumenta ligeramente la acidez, aunque cumple con las especificaciones.

Bibliografía

ECOÓLEO. PINHÃO MANSO: *Jatropha curcas*.

<http://www.pinhaomanso.com.br>.

Especificaciones de calidad para el biodiésel-B100, establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles.

Resolución ANP No. 42/2004.

Especificaciones de calidad para el combustible diésel S-500, establecidas por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Resolución ANP No. 310, de 27.12.2001. DOU 28.12.2001.

FOIDL, N. Y P. EDER. *Agro Industrial Exploitation of Jatropha curcas*.

Managua: Universidad Nacional Ingeniería. Departamento de Biomasa, Sucher&Holster, Austria.

MA, F. Y M. A. HANNA. «Biodiesel Production», *Bioresourse Technology*, v. 70, No. 1, p 1-15, 10/99.

PÉREZ R. L., et al. *Proyecto 2808. Obtención Nacional de Biodiésel CEINPET-CUPET. Etapa 01. 2006-2008.*

PÉREZ R. L., et al. *Proyecto 2808. Obtención Nacional de Biodiésel CEINPET-CUPET. Etapa 03. 2006-2008.*

SANTO, R. T. «Reações de esterificação produção de biodiesel cinética», Projeto final em Engenharia Química-Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2005.

ZAMORA, E., et al. *Transesterification of Jatropha curcas Oil*. Managua: UNI, Departamento de Biomasa, Sucher & Holster, Austria.

Modelación matemática de una planta para la producción de biodiésel

Mathematical modeling of a biodiesel production plant

Por Ing. Armando A. Díaz García, M.Sc. Ing. José A. Sotolongo Pérez**
y Lic. Sofía Montes de Oca López***

** Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Química,
Universidad de Oriente, Avenida de Las Américas s/n,
Santiago de Cuba, Cuba.
Tel.: (53 21) 327104.*

e-mail: armando@catedes.gtmo.inf.cu

*** Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible
(CATEDES),*

*Oriente No. 756 e/ Prado y Jesús del Sol, Guantánamo, Cuba.
Tel.: (53 21) 326489.*

e-mail: sotogtmo@enet.cu y sofia@catedes.gtmo.inf.cu

Resumen

En el presente trabajo se presenta la modelación matemática de una planta de producción de biodiésel de menos de 500 toneladas anuales. Se desarrolla la modelación matemática de los rendimientos y características productivas de las semillas para la siembra de *Jatropha curcas* y se obtienen, además, todos los datos necesarios para la evaluación económica de la planta para una producción dada, como hectáreas que se deben sembrar, peso de semillas a cosechar, peso de torta, peso de aceite, etcétera. A partir de la capacidad necesaria, y teniendo en cuenta la tecnología propuesta, se desarrolla la modelación matemática de las capacidades de los equipos necesarios y la magnitud de las corrientes de los fluidos involucrados en el proceso de acuerdo con el diagrama de flujo de la planta; se obtuvo un listado de las capacidades necesarias para los principales equipos involucrados en el proceso, así como de la magnitud de los flujos másicos y volumétricos de todos los materiales en el proceso. Finalmente, se modela matemáticamente el estimado del costo de la planta con 20% de aproximación, con vistas a determinar en próximos cálculos la factibilidad del proceso. La modelación de la planta se presenta programada en hojas Excel y permite el cálculo del estimado de costo de la planta y las características principales del proceso para cualquier capacidad planteada (menor de 500 ton/año).

Palabras clave: Modelación matemática, producción de biodiésel, *Jatropha curcas*.

Abstract

The current paper presents the mathematical modeling of a production plant of 500 tons a year of biodiesel. We present the mathematical modeling of the performance and characteristics of the seeds for the seeding of *Jatropha curcas* and obtain all the necessary data for the economic evaluation of the plant for a given production, like for instance hectares that should be seeded, weight of seeds to harvest, weight of cake, weight of oil, etcetera. From the necessary capacity, and taking into account the proposed technology, it is developed the mathematical modeling of the necessary sizes of the equipments and the value of the currents of the fluids in the process according to the flow chart of the plant. It was obtained sizing of the main equipment involved in the process, as well as the magnitude of the mass and volumetric flow of all the materials in the process. Finally, it was accomplished the estimation of the cost of the plant with 20% of approximation, with the objective of determining, in future calculations, the feasibility of the process. The modeling of the plant was carried out using Excel spreadsheets and enables the calculation of the estimate cost of the plant and the main characteristics of the process for any installed capacity under 500 ton year.

Keywords: Mathematical modeling, biodiesel production, *Jatropha curcas*.

Introducción

Uno de los rasgos predominantes en los cálculos industriales de hoy es la necesidad de disponer de programas de computación que permitan de una forma rápida, económica y segura estimar las magnitudes de las corrientes de los materiales involucrados en cada una de las líneas de proceso, así como las capacidades de los equipos principales y el estimado del costo de la planta para cualquier producción planteada.

La modelación matemática de los cálculos del proceso de producción permite establecer la relación entre las variables, de modo que sea posible conocer las relaciones cuantitativas.

En este caso, la producción de biodiésel está estrechamente relacionada con necesidades agrícolas, tecnológicas y económicas, y se hace preciso llevar a cabo programas de computación capaces de estimar necesidades de terreno, capacidades tecnológicas y las necesidades económicas.

En este trabajo se desarrolla un programa de computación en Excel que permita hacer un estimado del costo de plantas de capacidad semiindustrial (menor de 500 toneladas anuales) para la producción de biodiésel a partir de aceite de semillas de *Jatropha curcas*, según la tecnología de transesterificación utilizando metanol.

En esta trabajo se exponen los fundamentos del método para la modelación matemática de la planta para la producción de biodiésel utilizando como herramientas los índices de producción agrícolas,

balances de materiales, dimensionamiento de equipos y cálculos económicos, utilizando la programación en hojas Excel.

Con este trabajo se evita la necesidad de llevar a cabo estudios en plantas pilotos, lo que resulta costoso y necesita de mayor tiempo para el desarrollo del proyecto final de producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*, que se desarrolla en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible (CATEDES).

Desarrollo del trabajo

Metodología seguida para la modelación matemática de la planta

La metodología seguida para llevar a cabo la modelación matemática de la planta de biodiésel se muestra en el organigrama de la figura 1.

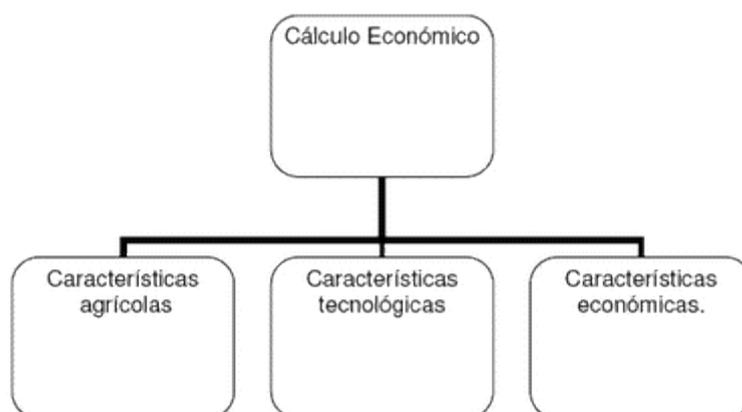


Fig. 1. Organigrama de la metodología para la modelación matemática de la planta de biodiésel.

1. Características agrícolas. Permite estimar las hectáreas de terreno que se deben cultivar para una producción determinada, así como las cantidades de productos y desechos que se obtendrán.
2. Características tecnológicas. Permite llevar a cabo el cálculo de los flujos de materiales involucrado en el proceso, así como las necesidades de materia prima y productos auxiliares. Se realiza un estimado de las dimensiones y capacidades de los equipos fundamentales.
3. Características económicas. Lleva a cabo el cálculo económico de la planta completa, así como el estimado del costo de los equipos fundamentales.

Modelación del estimado de siembra y otros datos agrícolas

Datos agrícolas acopiados.

Los datos seleccionados para llevar a cabo la modelación del cálculo de las características agrícolas son los siguientes:

- Entre 6 y 8% del aceite de la semilla se queda en la torta.
- La semilla aporta entre 32 y 35% de su peso en aceite. Por presión en seco.
- La torta tiene 57% de proteína bruta.

- Las semillas pueden pesar entre 0,48 y 0,72 g.
- Los rendimientos en aceite son de 0,48 kg de aceite por kg de semilla.
- Los rendimientos de semillas por hectárea, en función del tiempo de sembradas (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimientos de semillas por hectárea.

Tiempo, años	kg/ha
1	250
2	1 000
4	5 000
6	12 000

- Para más de 6 años de sembrada se obtienen 120 00 kg de semilla/ha.
- Se puede estimar una producción anual de 0,75-2,0 toneladas de biodiésel por hectárea, a partir del quinto año.
- Rangos de producción de semillas: 0,4-12,0 toneladas de semilla/ha, en 5 años de crecimiento.
- El estimado de producción de biodiésel, en la India, es 3 800 L/ha.
- El potencial de semilla es de 12,5 toneladas por hectárea y se obtiene una extracción de 45% de aceite.
- Mil semillas pesan 727 g y se tienen 1 375 semillas por kg, como promedio.
- Variedad Cabo Verde: 1 000 semillas pesan 682 g.
- Variedad Nicaragua: 1 000 semillas pesan 878 g.
- Variedad Mejicana no tóxica: 1 000 semillas pesan entre 524 y 901 g.
- Una hectárea que tiene 1 600 plantas produce cada 7 años cerca de 200 ¿qué? de biomasa, incluyendo las raíces. El contenido de materia seca es cercano a 25%. Esto da una biomasa de 80 toneladas de materia seca por hectárea.
- La extracción de 12 kg de semilla da 3 litros de aceite en África.
- Anualmente se obtiene alrededor de 30 ¿qué? de fruto/planta, de las cuales 12 ¿qué? son de semillas.
- En 400 plantas/ha 12 toneladas de frutos/ha y 4,8 toneladas de semilla, con un marco de siembra de 5x5.
- Cada 100 g de semilla se informa contener: 6,6 g de agua, 18,2 ¿qué? de proteína, 38,0¿qué? de aceite vegetal, 33,5 ¿qué? de hidratos de carbono total, 15,5 ¿qué? de fibra y 4,5 ¿qué? cenizas.
- Producción de aceite de *Jatropha curcas*: 1 590 L/ha.
- Por cada 6 000 litros de biodiésel que se produce se remueven de la atmósfera 56 toneladas de CO₂.
- Según datos registrados en México: 1 ha con 1 600 plantas cada una después de 7 años tiene aproximadamente 200 ¿qué? de biomasa, incluyendo raíces, 25% de materia seca y una biomasa de 80 toneladas de materia seca por hectárea.

- Bajo muy buenas condiciones la producción de semillas debe ser mayor de 5 kg/árbol o 12,5 MT/ha, y con escasas lluvias y suelos malos es de 1,5 MT/ha. Se ha supuesto condiciones promedio y suelos, y la producción de semillas de 1 500 g por árboles, correspondiente a 3,75 MT/ha.
- Una hectárea de *Jatropha curcas* en una producción promedio da 3,5 MT de semilla y 1,2 MT de aceite.

Programación en Excel

Haciendo una selección de los datos antes mencionados y teniendo en cuenta los resultados prácticos obtenidos en el trabajo experimental de obtención de aceite de *Jatropha curcas* en las plantaciones de El Oro, San Antonio de Sur, Guantánamo, se llevó a cabo la programación que se muestra en la figura 2, la cual consiste en una muestra de la hoja Excel de las necesidades agrícolas para una producción de 450 toneladas de biodiésel al año. En la Hoja Excel los datos pueden ser variados a voluntad:

- Índices para el cálculo.
- Años de siembra la *Jatropha curcas*.
- Marcos de siembra.
- % de extracción.

Nota: De acuerdo con las características del proceso de que se trate.

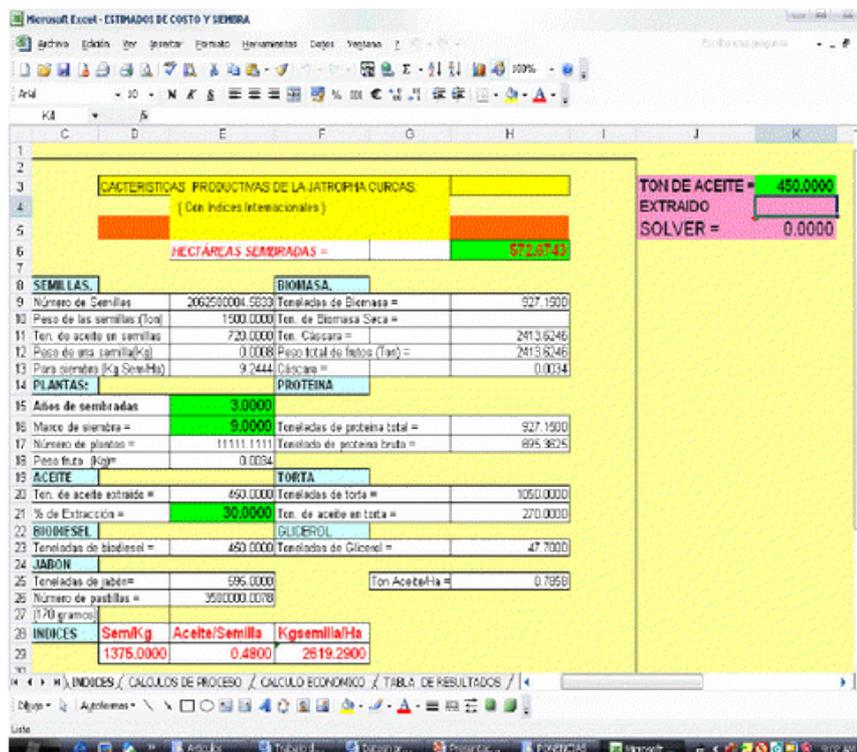


Fig. 2. Hoja Excel que muestra las características productivas de una siembra de *Jatropha curcas* con tres años de siembra para determinada producción.

Modelación de los cálculos para el proceso industrial. Proceso de producción de biodiésel propuesto

Para llevar a cabo la modelación matemática se seleccionó el proceso de producción más simple, sin que se lleve a cabo ningún tipo de purificación de las materias primas, así como de los productos intermedios y finales del proceso.

Descripción del proceso

Producción de biodiésel

- Esterificación.
- Neutralización.
- Transesterificación.
- Lavado del metilester.
- Secado del metilester.

Sección de esterificación

El objetivo de la unidad de esterificación es reducir el contenido de ácidos grasos en la acidez. La reacción se lleva a cabo en un reactor a una temperatura de 100-105 °C, con adición de etanol y utilizando ácido sulfúrico como catalizador. Los ésteres obtenidos tienen una acidez de 2 a 3 grados, y una vez lavados entran dosificados en la planta de neutralización.

Sección de neutralización

La planta seleccionada puede tratar productos hasta con un grado de acidez, antes de entrar en la planta de transesterificación, el aceite con acidez se mezcla en un reactor con glicerina alcalina y a continuación pasa a un decantador donde se separan las dos fases. El aceite pasa a la sección de transesterificación y las aguas glicéricas ricas en jabón se mandan a la sección de almacenamiento de glicerina.

Sección de transesterificación

La reacción de transesterificación se realiza en dos etapas, operando a temperaturas de 40 °C y a presión atmosférica. En la primera etapa se mezclan el aceite neutro con el catalizador (KOH disuelto en etanol) y un exceso de etanol, con el objeto de maximizar el rendimiento de la operación; después esta mezcla pasa a un tanque decantador, donde el producto tiene un tiempo de reposo para la separación de las fases.

Por la parte inferior sale la fase pesada (contiene glicerina, parte del exceso de etanol y casi la totalidad del jabón); parte de esta mezcla es enviada a la neutralización y otra a la preparación de la glicerina. Por la parte superior el metilester pasa a la segunda sección de transesterificación. En la segunda etapa se mezcla el metilester con una mezcla de etanol, KOH y glicerina; de esta manera se favorece la terminación de la formación de metilester. La mezcla vuelve a pasar a un tanque decantador en el que se separan las dos fases. La fase pesada pasa a la sección de preparación de la glicerina y la fase ligera es

metilester, que contiene trazas de glicerina, jabones, etanol; estas impurezas son eliminadas en la sección de lavado del metilester.

Sección de lavado

El metilester obtenido contiene trazas de glicerina, jabones, catalizador; estas impurezas son eliminadas a través de dos lavados con sus respectivos decantadores. El primer lavado se lleva a cabo con agua ácida y el segundo con agua. El metilester libre de glicerina, catalizador y jabones tiene que ser secado para eliminar los restos de agua y etanol.

Sección de secado

El metilester es calentado a través de unos intercambiadores, antes de ir al tanque flash, donde se eliminan parte del etanol y el agua; a continuación entran en la columna de secado, donde el etanol y el agua son eliminados de forma tal que cumplan con las normas establecidas para el biodiésel.

Balance de materiales

Se modelará la producción de biodiésel utilizando alcohol metílico e hidróxido de sodio como catalizador.

Balance de materiales

$$\frac{Ma + Mh + Mm}{Me} = \quad (1)$$

Donde:

Ma: Masa de aceite.

Mh: Masa de hidróxido de sodio.

M_m: Masa de metanol.

Me: Masa de producto esterificado.

$$\frac{Me}{Mb} = Mg + \quad (2)$$

Donde:

Mg: Masa de glicerina.

Mb: Masa de biodiésel.

Por la estequiometría de la reacción:

$$\frac{Mb}{Ma} = \quad (3)$$

$$\frac{Mg}{Mh} = Mm + \quad (4)$$

$$\frac{Mm}{1,0 \cdot Ma} = \quad (5)$$

$$\frac{Mh}{0,006 \cdot Ma} = \quad (6)$$

Sustituyendo (5) y (6) en (4):

$$Mg = 0,106 \cdot Ma \quad (7)$$

Dimensionamiento de los equipos fundamentales de la planta

Tanque para almacenar el metanol

Tomando para almacenar n días.

El volumen de metanol para una producción diaria de biodiésel Mb viene dado por:

$$Vm = 0,1 Mb / \rho_m \quad (8)$$

El diámetro del tanque cilíndrico horizontal soterrado tomando $L = 2 \cdot D$

$$Vm = (\pi D^2 / 4) L = \pi D^3 / 2 \quad (9)$$

Sustituyendo (8) en (9) y teniendo en cuenta que es para n días:

$$n (0,1 Mb / \rho_a) = \pi D^3 / 2$$

Despejando:

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,2 \cdot n \cdot Mb}{\pi \rho_a}}$$

$$H = 15,2 \cdot D$$

Que son las dimensiones del tanque de almacenamiento de metanol para n días, para una planta que produce Mb kilogramos biodiésel por día.

Tanque para almacenar aceite de Jatropha curcas

Tomando para almacenar p días y llevando a cabo Nt templeas al día.

El volumen para una producción diaria de biodiésel Mb viene dado por:

$$Va = Ma / \rho_a = Mb / \rho_a$$

Para un tanque, para almacenar p días de aceite:

$$Va = (\pi D^2 / 4) H$$

Tomando $H = D$ y despejando:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot p \cdot Mb}{\pi \rho_a}}$$

$$H = 125 \cdot D$$

Tanque para la preparación del metóxido de sodio

$$V_m = (M_m / \rho_m) = 0,1 M_b / \rho_m$$

$$V_m = (\pi D^2 / 4) H$$

Teniendo en cuenta que se llevaran a cabo Nt templeas y tomando $H = D$ y despejando:

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,4 \cdot M_b}{\pi \cdot N \cdot \rho_m}}$$

$$H = 125 \cdot D$$

Tanque reactor (provisional)

Hasta tanto no se logre un equipo que permita trabajar de forma segura y eficiente, siempre será posible llevar a cabo la operación en un tanque cilíndrico cerrado con agitación con altura suficiente para evitar derrames.

$$V_R = \frac{M_a + M_m}{Nt \cdot \rho_{mezcla}} = \frac{1,1 \cdot M_b}{Nt \cdot \rho_{mezcla}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_R}{Nt \cdot \pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4,4 \cdot M_b}{Nt \cdot \pi \cdot \rho_{mezcla}}}$$

$$H = 1,5 \cdot D$$

Tanque separador

Con las mismas dimensiones del tanque reactor, pero menor altura:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4,4 \cdot M_b}{Nt \cdot \pi \cdot \rho_{mezcla}}}$$

$$H = 125 \cdot D$$

Tanque para almacenar la glicerina producida

Tomando para almacenar n días (la misma cantidad de días que los propuestos para el aceite):

$$V_g = \frac{M_g}{Nt \cdot \rho_g} = \frac{0,1 \cdot M_b}{Nt \cdot \rho_g}$$

Para almacenar la glicerina producida:

$$\sqrt[3]{\frac{4 \cdot N_t \cdot n \cdot V_g}{\pi}}$$

$$\sqrt[3]{\frac{04 \cdot n \cdot M_b}{\pi \cdot \rho_g}}$$

$$H = 125 \cdot D$$

Tanque para almacenar el biodiésel producido

Tomando para almacenar n días (la misma cantidad de días que los propuestos para el aceite)

$$V_b = \frac{M_b}{N_t \cdot \rho_b}$$

Para almacenar el biodiésel producido:

$$\sqrt[3]{\frac{4 \cdot N_t \cdot n \cdot V_b}{\pi}}$$

$$\sqrt[3]{\frac{4 \cdot n \cdot M_b}{\pi \cdot \rho_b}}$$

$$H = 125 \cdot D$$

En la figura 3 se muestra de ejemplo la hoja Excel correspondiente al cálculo de las dimensiones y características del proceso para una producción de 450 toneladas al año.

En esta programación es posible variar a voluntad:

- Toneladas al año a producir.
- Días al año de trabajo de la planta.
- Horas de trabajo industrial diario.
- Templas a producir en un día de trabajo.
- Días de reserva: Volumen de materia prima disponible.
- Días de producción: Volumen de material elaborado que se debe almacenar.

PLANTA PARA PROCESAR (Ton/año de aceite) = 150.000

MATERIA	ACEITE	ETANOL	GLICERINA	BIODIESEL	BIODIESEL METOXIDO	DECANTADOR	Reserva	ETANOL	BIODIESEL	
DENSIDAD (Kg/m ³)	921,000	792,000	1,260,000	900,000	2130,000	991,650	954,000			
FLUJO Máximo (Kg/día)	1800,900	630,000	630,000	1800,900	6,840	2430,000	2430,000			
VOLUMEN (litro)	1,954	0,795	0,500	2,000	0,003	2,475	2,500			
VOLUMEN /TEMPLA	0,651	0,265	0,167	0,667	0,001	0,833				
VOL DE TANQUES	1,354	0,795	0,500	2,000	DOSIS	0,838	7,500	13,681	5,568	30,000
Diametro de Tanques	1,355	1,004	0,860	1,366	MANUAL	1,046	2,122	2,592	1,921	3,868
Área de tanques (m ²)	1,694	1,255	1,075	1,707		1,307	2,652	3,210	2,407	4,730

	día-año	hr día	templar día	reserva día	almacenar día	proceso día
Tiempo de trabajo	250,000	7,000	3,000	7,000	15,000	1,000

DATOS AGRICOLAS	Marco	Plantas/ha	KgSem/ha	Acil/Kg Sem	IR Ac/ha	Ha Sembrar
INTERNACIONAL	9,000	1111,111	2619,290	0,326	853,189	527,433

ESTIMADO COSTO		
MINIMO	MEDIO	MAXIMO
698630,311	873287,889	1047945,167

Fig. 3. Hoja Excel que muestra las características principales de los tanques y reactores involucrados en el proceso de producción.

Modelación de los cálculos para el estimado económico

Se llevó a cabo un estimado de costo con 20% de aproximación basado en índices de costos de producción internacionales. Todas las ecuaciones de costo para los equipos fueron tomados de la literatura técnica especializada y utilizando para su modelación ecuaciones de regresión con mas de 98% en el valor de los coeficientes.

Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en el programa para una capacidad de producción de 500 toneladas al año, son los siguientes: Costo de compra de los equipos fundamentales: 153 000 USD; costo de la inversión total (incluidos edificaciones y patios): 873 000 USD; costo de la planta RM Energy: 215 250 euros, aproximadamente 250 000 USD; relación entre el precio calculado y el de RM Energy: 0,71.

Los precios de los equipos completos para plantas producidos por RM Energy, los cuales no incluyen los tanques de reserva y almacenamiento, son (Tabla 2):

Tabla 2. Precios de los equipos para plantas producidas por RM Energy

Descripción: RM Energy	Capacidad por año, litros	Precio, euro
RM Energy 500	500 000	215 250,00
RM Energy 1000	1 000 000	252 00,00
RM Energy 2000	2 000 000	346 500,00
RM Energy 4000	4 000 000	451 500,00

Como puede observarse, comparando los precios para plantas de 500 ton/año de la RM Energy y los calculados, el costo de todos los equipamientos es aproximadamente 60% mayor; debe tenerse en cuenta que en el método de estimación empleado solo se computan los precios de los equipos fundamentales, y en los precios de las plantas RM Energy se incluyen tuberías e instalaciones eléctricas.

COSTO DE EQUIPOS PRINCIPALES		INDICE DE COSTOS =		9,00
TANQUES				
Acetate (Reserva) =	4518.09	20590.20	Costo de equipamiento =	152559.62
Alcohol (Reserva) =	1838.90	12060.74	Instalación de equipos =	64075.04
Acetate (Proceso) =	645.44	6468.85	Tuberías =	131201.27
Alcohol (Proceso) =	262.70	3789.14	Instalación Eléctrica =	30511.92
Descarga reactor =	296.88	4073.57	Edificación (incluye servicios) =	53395.87
Decantador (Colector) =	2476.88	14399.12	Pátios =	15255.96
Biodiesel (Proceso) =	660.50	6558.24	Facilidades de servicios =	76279.81
Tanque de Biodiesel =	165.13	2874.50	Costos físicos totales =	523279.50
Tanque de glicerina (colec) =	2476.88	14399.12	Ingeniería y construcción =	99163.75
Tanque Biodiesel (colec) =	6482.28	25523.51		
Reactor (Importado) =	296.88	18770.90		
Tanque de agua (Gral.) =	10000.00	8507.84		
Bomba acetate (Proceso) =	60.00	3111.11	Costos directos =	622443.26
Bomba acetate (Almacén) =	60.00	3111.11	Contratistas =	43571.03
Bomba Glicerina (Proc.) =	30.00	2605.27	Contingencias =	93366.49
Bomba Glicerina (Alm.) =	30.00	2605.27		
Bomba Biodiesel (Almac.) =	60.00	3111.11	Capital fijo =	759380.77
			Capital de trabajo =	113907.12
COSTO TOTAL DE EQUIPOS		152559.62		
ESTIMADO				
	MÍNIMO	MEDIO	MÁXIMO	
	698630.31	873287.89	1047945.47	

Fig. 4. Hoja Excel que muestra la parte correspondiente a los cálculos económicos para la producción de 450 ton/año.

Valoración económica y aporte social

Este trabajo contribuye a llevar a cabo los cálculos económicos indispensables para el desarrollo de los proyectos de inversión industrial sin necesidad de los gastos en que se incurren con otros métodos tradicionales y que en ocasiones pueden llegar a tener un monto de 10-15% de los costos del proyecto de inversión final; permite, además, dominar la técnica de producción de biodiésel y disponer de información

indispensable para el desarrollo de un proyecto que podría contribuir eficazmente a solucionar el combustible necesario para el transporte público de la ciudad con recursos propios.

Conclusiones

1. El programa elaborado, pese a sus grandes simplificaciones sobre todo en el proceso industrial, permite conocer con determinado grado de certeza un estimado de las necesidades de terreno, equipos, volúmenes, costos, etc., necesarios para los estudios iniciales de un proceso de inversión.
2. Es posible obtener soluciones muy rápidas en el caso de las discusiones relativas a capacidades de producción y necesidades inherentes.

Bibliografía

MONTES DE OCA LÓPEZ, SOFÍA; JOSÉ A. SOTOLONGO PÉREZ Y ARMANDO A. DÍAZ GARCÍA. «Características de la *Jatropha curcas* (Monografía)», en *Revista Tecnología Química*. Santiago de Cuba, Universidad de Oriente.

SOTOLONGO PÉREZ, JOSÉ A Y ARMANDO A. DÍAZ GARCÍA. *Todo sobre biodiésel*. (Monografía). Santiago de Cuba: Universidad de Oriente.

Acción lubricante del biodiésel en las mezclas alcohol/diésel

Lubricating action of biodiesel in alcohol-diesel mixtures

Por M.Sc. Yordanka Reyes Cruz, PhD. Donato A. Gomes Aranda**,
Ing. Alberto Cavado Osorio*, PhD. Carlos Rodríguez Pereira Belchior****

** Centro de Investigaciones del Petróleo, Ciudad de La Habana, Cuba.*

*** Escuela de Química, Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil.*

**** Ingeniería Naval y Mecánica, Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil.*

e-mail: yreyes20042001@yahoo.es

Resumen

En este trabajo se presentan los principios físico-químicos de acción de los aditivos usados para mejorar la lubricidad de los combustibles. Adicionalmente, se propone y evalúa el biodiésel como aditivo mejorador de lubricidad en la mezcla alcohol-diésel. Los estudios de lubricidad se realizaron por la norma ASTM D 6079-99, en el Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Sao Paulo (IPT), con resultados positivos. La película lubricante de la mezcla alcohol-diésel, aditivada con biodiésel, se mantiene bajo las mismas condiciones de carga y temperatura que el diésel de referencia. Resultados satisfactorios, como los que se obtuvieron en este estudio, son el inicio de la evaluación del biodiésel como aditivo mejorador de lubricidad en estas mezclas, aspecto que implicaría el posible uso generalizado de las mezclas en el país.

Palabras clave: Biodiésel, diésel, lubricidad de los combustibles.

Abstract

In this paper we present physicochemical principles of action of the additives used to improve the lubricity of fuels. Additionally, it is proposed and evaluated the biodiesel as an additive capable of enhancing lubricity in the mixture alcohol-diesel. Studies on lubricity were carried out following the ASTM D 6079-99 standard, at the Institute of Technological Research in Sao Paulo (IPT), with positive results. The lubricant film of the mixture alcohol-diesel, with biodiesel as an additive, is kept under the same carrying and temperature conditions than the reference diesel. Suitable results like the ones obtained in this study, are the beginning of the evaluation of biodiesel as an enhancer of lubricity additive in these mixtures, aspect that would imply the possible generalization of mixtures in the country

Keywords: Biodiesel, diesel, fuels lubricity

Introducción

Como es conocido en Cuba, la cuestión del combustible diésel aún corresponde a un problema de difícil solución. A pesar de la creciente producción de petróleo nacional [Agência..., 2006], todavía permanece la dependencia externa de combustibles [Agência..., 2006]. Tal

dependencia es particularmente significativa en el caso del combustible diésel [Agência..., 2006]. Además de estos aspectos, es importante considerar los aspectos ambientales. Las emisiones específicas de los motores diésel son significativas, no solo en el sector eléctrico (generación en los grupos electrógenos que consumen diésel) [Agência..., 2006], sino principalmente en el sector de transporte, responsable del mayor consumo de este combustible [Agência..., 2006].

Por todos estos motivos, la reducción en el consumo de combustible diésel es objeto de estudio de diversos especialistas en el asunto, buscando reducir su consumo, tanto en el sector de transporte como en el sector eléctrico. Buscando alcanzar este objetivo, es importante adoptar políticas sustentables que permitan sustituir el combustible diésel por otros energéticos de forma técnicamente adecuada, como por ejemplo, la mezcla alcohol y diésel.

Pero la solución no es tan simple como puede parecer a primera vista. Ocurre que el alcohol no se mezcla bien con el diésel, al contrario de la gasolina, que presenta buena miscibilidad con el etanol por tener elevada concentración de hidrocarburos aromáticos en su composición. El diésel, con una fracción superior de moléculas apolares, admite concentraciones muy bajas de etanol en una única fase. De ese modo, para la adición de cantidades razonables de etanol en el diésel, es necesario utilizar tensioactivos que mantengan la mezcla homogénea en condiciones de almacenamiento, especialmente a bajas temperaturas y expuestas a la humedad del aire [Irshad, 2000, 2001 y 2003, y Tarozo, 2005]. Además, las características del motor de ciclo diésel son bien diferentes del ciclo Otto. Si adiciones de etanol a la gasolina ayuda a aumentar octanaje, eso no ocurre con el número de cetano del diésel, lo que indica que es necesario adicionar promotores de cetano a esa mezcla.

Otros aspectos, como la lubricidad del combustible, deben ser considerados para obtener un combustible de calidad aceptable. De acuerdo con el programa de investigaciones desarrollado en el país, referente al consumo de estas mezclas, se presenta el siguiente trabajo que tiene como objetivo la evaluación del biodiésel como mejorador de lubricidad en las mezclas alcohol-diésel.

Materiales y métodos

Materias primas

En la formulación de las mezclas estudiadas se utilizaron las materias primas siguientes:

- Diésel brasileño: Diésel automotor S-500, cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la Norma ANP No. 310, de 27.12.2001. DOU 28.12.2001 [Agência..., 2006].
- Alcohol etílico anhidro combustible (AEAC), grado alcohólico: 99,3º INPM, cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la Norma ANP N° 2, de 16.1.2002. DOU 17.1.2002 [Agência..., 2006].

- Biodiésel, producido en la planta de Agropalma, en Belén-Pará, a partir de residuos del refino del aceite de palma, cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la Norma de la ANP - Resolución 42 [Agência..., 2006]

Métodos y procedimientos experimentales

Caracterización físico-química del combustible diésel y de las mezclas estudiadas. A partir de las materias primas relacionadas, se formularon las mezclas estudiadas. La caracterización físico-química, tanto del combustible diésel utilizado como de las mezclas formuladas, se realizó en el Laboratorio de Físico-Químicos del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), usando los métodos establecidos en las normas [Annual Book..., 1998; y Unión..., 2002].

Estudios de lubricidad. Aditivos

Para estudiar la eficiencia del biodiésel como aditivo mejorador de la lubricidad de estas mezclas se estudiaron, en el Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), la lubricidad de las muestras siguientes:

1. Combustible diésel S-500.
2. Combustible diésel S-500 + 8% etanol anhidro.
3. Combustible diésel S-500 + 8% etanol anhidro + 2% biodiésel.

Los estudios de lubricidad se realizaron usando los métodos: ASTM D 6079-99 «High Frequency Reciprocating Rig» e ISO 12156 «Diesel Fuel-Assessment of Lubricity Using the High Frequency Reciprocating Rig» (HFRR).

En estos métodos la lubricidad del combustible es evaluada a partir de la huella de desgaste (WSD: Wear Scar Diameter) promovida entre una esfera de acero oscilante, sometida a una carga de 200 g, y un disco de acero fijo completamente sumergidos en 2 mL de combustible, bajo condiciones específicas (Fig. 1).

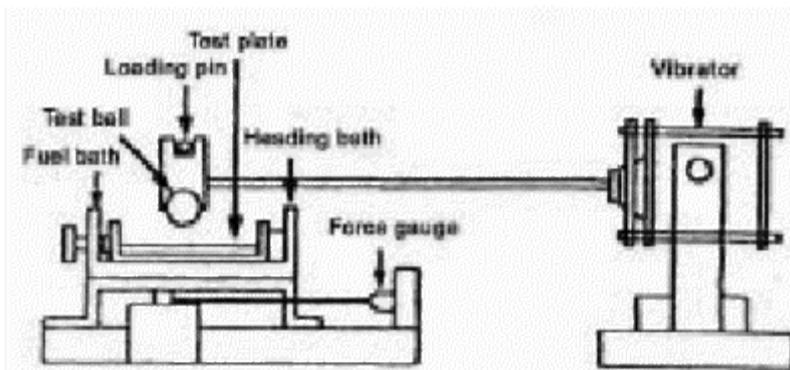


Fig. 1. Diseño esquemático del equipo HFR2 utilizado en el ensayo HFRR.

Conforme se puede inferir de sus títulos, estas normas se aplican solamente para combustible diésel y no tienen en cuenta la evaporación de componentes del combustible.

Teniendo en cuenta la presencia del etanol en algunas muestras, este procedimiento fue modificado con el objetivo de reducir la evaporación del alcohol que compone las mezclas, ensayadas a 60 °C, y los efectos de este fenómeno en los resultados de las evaluaciones en cuestión.

Se utilizó, en sustitución al recipiente patrón, un recipiente desarrollado por el fabricante del equipamiento HFRR para combustibles volátiles, no normalizado, adaptado a un dispositivo que busca mantener la concentración de alcohol de las mezclas durante el ensayo.

Para evitar la introducción de nuevas fuentes de error en la comparación de los resultados, la muestra de combustible diésel también fue ensayada bajo las mismas condiciones.

Las condiciones de ensayo se especifican en la tala 1.

Tabla 1. Condiciones de ensayo

Identificación de las muestras	1	2	3	4	5	6
Temperatura ambiente inicial, °C	18	20	20	19,1	20	19
Humedad relativa inicial, %	53	65	62	57	60	53
Temperatura ambiente final, °C	20	20	20	20	19	20
Humedad relativa final, %	56	63	58	59	54	58
Temperatura del combustible, °C	60	60	60	60	60	60

Resultados parciales y discusión

Lubricidad

El diésel, además de las características necesarias para un buen desempeño como combustible, debe actuar también como lubricante en determinadas partes móviles del sistema de inyección, como bombas rotativas e inyectores [Ministério..., 2000].

Cuando un combustible no tiene buena lubricidad se perjudica su capacidad de disminuir el coeficiente de fricción entre las superficies en contacto. Esto es particularmente crítico en el caso de las bombas rotativas, porque sus componentes internos son lubricados por el propio combustible (Fig. 2) [Ministério..., 2000]. En este caso, el combustible debe tener una lubricidad adecuada que garantice la durabilidad del sistema de inyección, evitando el desgaste prematuro de los componentes.

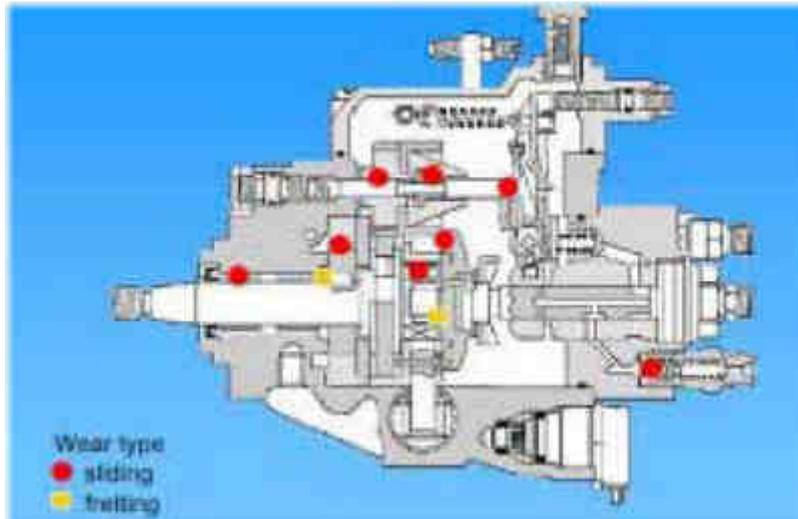


Fig. 2. Puntos críticos de contacto de una bomba rotativa en relación al desgaste (adhesivo y por fatiga).

Es importante destacar que el consumo de las mezclas de alcohol con diésel no debe implicar ninguna alteración tecnológica en el motor, ni siquiera exigir cambios en su regulación. Para lograr esta premisa, la mezcla combustible debe cumplir con las mismas especificaciones de calidad del combustible diésel.

Sin embargo, es conocido que la adición de etanol al diésel disminuye su viscosidad y consecuentemente su capacidad lubricante. Pruebas a escala de banco dinamométrico y campo mostraron que estas mezclas no deben ser usadas en motores cuyo sistema de inyección es con bombas rotativas. Para corregir esta pérdida de lubricidad están en estudio varios aditivos que deben ser evaluados a través de ensayos de durabilidad en banco de motores [Ministério..., 2000].

Estos aditivos deben ser formulados, fundamentalmente, a partir de compuestos activos de superficie que actúen como agentes lubricantes, como mezclas de ácidos grasos, ésteres o amidas, con afinidad por las superficies metálicas.

En estos casos, hay formación de una película lubricante que evita el contacto metal-metal, que ocasiona desgaste sobre cargas ligeras y moderadas. Concentraciones entre 0,1 y 1% de aditivo generalmente son suficientes para corregir la lubricidad a niveles adecuados [Campi, *et al.*, 1999, y Enciclopedia..., 2005].

La película lubricante es formada por la absorción en la superficie metálica de moléculas de sustancias polares, adicionadas al combustible como aditivos (Fig. 3) [Glasstone, 1972; Sá, 2002, y Trujillo, 2004].

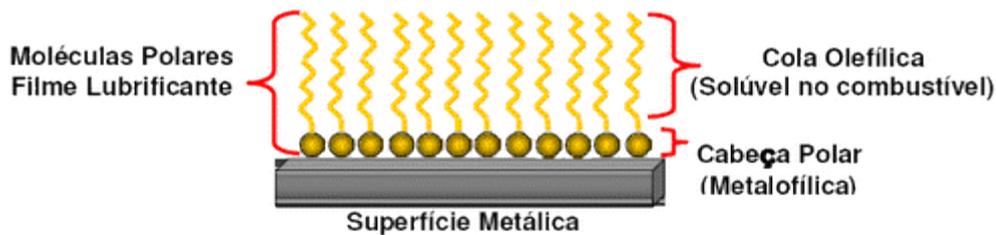


Fig. 3. Formación de la película lubricante por adsorción de moléculas de sustancias polares sobre la superficie metálica.

El metal es considerado como una superficie electrostática, donde existe una nube electrónica, por tanto está cargado negativamente, atrayendo a sustancias polares como es el caso de los ésteres. Esta atracción ocurre por el átomo de carbono, de la carbonila del éster ($C = O$), que tiene densidad de carga $\delta(+)$ [Campi, et al., 1999; Glasstone, 1972; Guibet y Faure-Birchem, 1999, y Sá, 2002].

Las moléculas se fijan a la superficie bajo el mecanismo de adsorción física [Glasstone, 1972, y Guibet y Faure-Birchem, 1999].

La adsorción física consiste en la acción de fuerzas coercitivas de naturaleza eléctrica y magnética, como las fuerzas de Van der Waals, que están presentes tanto en el material absorbente como en la sustancia a ser adsorbida [Glasstone, 1972, y Guibet y Faure-Birchem, 1999].

Cuando ocurre compatibilidad de fuerzas, ocurre una atracción entre el absorbente y la sustancia a ser adsorbida, resultando en la fijación de las moléculas de la sustancia en la superficie del sólido. Para este tipo de adsorción podemos tener varias capas de moléculas adsorbidas [Glasstone, 1972, y Guibet y Faure-Birchem, 1999].

Formulación y caracterización de las mezclas bases para la evaluación del aditivo

En los laboratorios del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET) se realizó la caracterización físico-química de las muestras siguientes:

1. Combustible diésel S-500.
2. Combustible diésel S-500 + 8% etanol anhidro.
3. Combustible diésel S-500 + 8% etanol anhidro + 2% biodiésel.

Los resultados se presentan en la tabla 2.

Estas muestras serán utilizadas como base en las pruebas para el desarrollo y evaluación del aditivo final.

Tabla 2. Caracterización físico-química del diésel y de las mezclas estudiadas

Características	Método	Especificación	Comb. diésel S-500	Comb. diésel S-500 + 8% AEAC	Comb. diésel S-500 + 2% biodiésel + 8% AEAC
Densidad a 15 °C, kg/m ³	ASTM D 1298	0,820-0,865	0,8576	0,8556	0,8563
Corrosión en lám. de cobre, 3h a 50 °C	ASTM D 130	1 máx.	1 b	1b	1b
Azufre total, % m/m	ASTM D 1266	0,05 máx.	0,026	0,022	0,020
Acidez, mg KOH/g	ASTM D 974	-	0,028	0,0272	0,0278
Viscosidad a 40 °C, mm ² /s	ASTM D 445	2,5-5,5	4,6737	4,5823	4,6241
Color ASTM	ASTM D 1500	3,0 máx.	1,0	1,0	1,0
Punto de inflamación, °C	ASTM D 93	38 mín.	87	13	13
Agua y sedimentos, % v/v	ASTM D 96	0,05 máx.	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Número de cetano	ASTM D 613	42 máx.	60,5	51,5	51,5
Poder calórico, kcal/kg	ASTM D 240	-	10 100	9 802	9 786
Residuo de carbono, % m/m	ASTM D 189	0,05 máx.	0,04	0,037	0,035
Cenizas, % m/m	ASTM D 482	0,020 máx.	0,007	0,003	0,0026
Aromáticos totales, % m/m	Ultravioleta		31,34	29,87	27,25
Destilación, °C	ASTM D 86		217,0	79,0	79,0
PIE			388,0	387,0	388,0
PFE			98,0	99,0	98,5
% Recobrado			1,0	0,5	0,2
% Pérdida			1,0	0,5	0,3

Propuesta y evaluación del biodiésel como aditivo lubricante en la mezcla alcohol-diésel

En este ítem el objetivo está centrado en la propuesta de un aditivo que aumente la lubricidad de la mezcla afectada con la adición del alcohol, permitiendo una adecuada utilización del combustible en sistemas de inyección con bomba rotativa. Esta ha sido la limitante principal en la aplicación generalizada de esta mezcla. Las bombas de inyección pueden ser clasificadas en los modelos en línea o rotatorias y son el componente más importante del sistema de alimentación de los vehículos diésel. Una característica muy importante de las bombas rotatorias es que la lubricación de sus componentes internos es realizada por el propio combustible, lo que las torna más susceptibles a las características del mismo, especialmente a las alteraciones en la lubricidad y a la presencia de agua u otros contaminantes.

A diferencia de las bombas rotatorias, las bombas en línea son lubricadas internamente por el aceite del cárter del motor, lo que las torna menos susceptibles a los efectos del combustible. En la propuesta del aditivo mejorador de lubricidad, el primer candidato fue el biodiésel, que cumple con las características exigidas para productos usados con estos fines. En el Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo se estudió la lubricidad de las muestras relacionadas, utilizando los métodos ASTM D 6079-99 «High Frequency Reciprocating Rig» e ISO 12156 «Diesel Fuel-Assessment of Lubricity Using the High Frequency Reciprocating Rig» (HFRR)[American Society..., 2003; *Annual Book...*, 1998]. La concentración de cada uno de los componentes en las mezclas fue seleccionada considerando:

- 8% etanol anhidro, porcentual ideal optimizado [Campi, et al., 1999, y Ecológica..., 1999].
- 2% de biodiésel, regulado por la ANP a partir del 2006, con obligatoriedad a partir del 2008. Los resultados de los ensayos de lubricidad se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de lubricidad

No	Identificación de las muestras	Volumen del recipiente, mL	Taza de renovación del comb., mL/min	Desgaste medio ASTM 6079 WSD, mm	Desgaste medio ISO 12156 WS1,4, μm	Coefficiente medio de desgaste	Espesura media de la película lubricante %
1	Combustible diésel S-50	15	1,2	0,35 \pm 0,02	355	0,223	59
2	Combustible diésel S-500 + 8% etanol anhidro	15	1,4	0,42 \pm 0,02	410	0,237	11

3	Combustible diésel S-500 + 8% etanol anhidro + 2% biodiésel	15	2,1	0,34 ± 0,02	352	0,193	43
---	---	----	-----	-------------	-----	-------	----

Las consideraciones relacionadas con los resultados obtenidos en los ensayos de lubricidad se presentan a continuación:

1. El ensayo realizado con la muestra 2 permitió clasificarla como no adecuada para su consumo en motores diésel.

El desgaste provocado por esta muestra es superior al límite especificado por la norma ISO 12156 (WS1,4) y recomendado por la BOSCH para evitar el desgaste excesivo del sistema de inyección (400 µm (máx.) a 60 °C).

2. En la muestra 3, aditivada con biodiésel, los valores nominales de desgaste se aproximan a aquellos obtenidos con la muestra 1 (combustible diésel). Se observó una significativa reducción en las medidas de los diámetros de la elipse de desgaste.

Como se comprobó en el análisis anterior, el biodiésel posee la propiedad de aumentar la lubricidad de la mezcla. Sin embargo, a pesar de que los resultados de los ensayos de medición de lubricidad, realizados en laboratorio, muestran que los resultados obtenidos con la mezcla aditivada son mejores que los encontrados para el diésel puro, es imprescindible la realización de estudios de durabilidad acelerada en dinamómetro con motor equipado con bomba de inyección rotativa para reafirmar la efectividad del aditivo.

Conclusiones

1. Cuando se pretende trabajar con concentraciones de alcohol superiores a 3% o extender el consumo de estas mezclas a motores diésel equipados con bombas de inyección rotatorias es necesario introducir en la formulación un tercer elemento, denominado «aditivo».
2. La mezcla de diésel con 8% de etanol anhidro no tiene lubricidad adecuada para su utilización en motores diésel.
3. El biodiésel se mostró como aditivo mejorador de lubricidad.
4. El desgaste provocado por la mezcla aditivada con biodiésel fue nominalmente inferior al observado en la muestra de combustible diésel.

Bibliografía

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. *Anuário Estatístico*. Río de Janeiro. Disponible en: <http://www.anp.gov.br>. Acceso en: 13 de marzo de 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 6079-99 High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)*. West Conshohocken, PA, USA, 2003.
- Annual Book of ASTM Standards: Petroleum products, Lubricants and Fossil Fuels*, section 5, v. 1, 2, 3 and 4, Easton, USA, 1998.

CAMPI, A. R., et al. Depósito de Patente Brasileira-PI9903413-1. *Aditivo para melhorar as propriedades de combustível automotivo*. 4 de agosto de 1999.

CAMPI, A. R., et al. Depósito de Patente Brasileira-PI9903414-0. *Mistura alcoólica solúvel em óleo diesel*. 4 de agosto de 1999.

Ecológica de Mato Grosso, Industria e Comércio Ltda. (ECOMAT). *Mistura álcool-diesel AEP-102, Aspectos sócio-econômicos e ambientais*. 1999.

Enciclopedia Online. Disponible en: <http://www.tiosam.com/enciclopedia/Diesel>. Acceso en: 10 de agosto de 2005.

GLASSTONE, S. *Tratado de Química-Física*. Universidad de Oklahoma. La Habana: Instituto Cubano del Libro, Ed. Científico-Técnica, 1972.

GUIBET, J. AND E. FAURE-BIRCHEM. *Fuel and Engines*. v. I y II. Francia: Editions Technip, 1999.

Irshad Ahmed. US Patent 6,017,369. *Diesel fuel composition*. January 25, 2000.

Irshad Ahmed. US Patent 6,183,524. *Polymeric fuel additive and method of making the same, and fuel containing the additive*. February 6, 2001.

IRSHAD AHMED. US Patent 6,306,184. *Diesel fuel composition*. 2003.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool. *Sumário Executivo Mistura de 3% de álcool ao Diesel (MAD3)*. Brasília: diciembre, 2000.

Reglamento Técnico ANP Nº 6/2001 referente as especificações do óleo diesel automotivo comercializado em todo o território brasileiro. 2001.

SÁ, S. R. *Apostila de Físico-Química, Termodinâmica das Superfícies*. p. 1-4, 19, 23-24, 2002.

TAROZO, R. *Relatório de conclusão do Estágio Supervisionado em Química*. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas-Departamento de Química. Paraná, Brasil, 2003. Disponible en: <http://www.uel.br/grupo-pesquisa/meioambiente/>. Acceso en: 10 de agosto de 2005.

TRUJILLO, G. *Manual del seminário «Machinery Lubrication & Oil Analysis»*. México: Noria Latín América, 2004.

UNIÓN CUBAPETRÓLEO. *Catálogo de especificaciones, Rama Combustibles*. La Habana: MINBAS, julio de 2002.

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas.

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bértiz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO

ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo
Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía
fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo
(Energía eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía
hidráulica)

Dr. Dania González Couret
(Arquitectura bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa
(Energía humana)

Lic. Ricardo Bértiz Valle (Educación
ambiental)



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.
Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>