

Extracción y análisis de bioaceite pirolítico a partir de biomasa: una fuente de energía alternativa para motores a reacción.

Gutiérrez Bravo, Javier ^{1,*}, González González, Juan Félix ², Galán González, Carlos Alberto ², García Pérez, Ana Isabel ³, Gonzalo de Grado, Jesús ³ y Suárez Mejías, Rocío ²

¹ Academia Básica del Aire. Ejército del Aire. La Virgen del Camino, 24198-León. Email: *jgutbra@ea.mde.es* (J.G.B.)

² Departamento de Física Aplicada. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. 06071-Badajoz. Emails: *jfelixgg@unex.es* (J.F.G.G.), *cgalango@unex.es* (C.A.G.G.)

³ Departamento de Química y Física Aplicadas. Escuela de Ingenierías Industrial e Informática. Universidad de León. 24071-León. Emails: *ana.garcia@unileon.es* (A.I.G.P.), *jesus.gonzalo@unileon.es* (J.G.G.)

* Autor Principal y responsable del trabajo: *jgutbra@ea.mde.es* (J.G.B.)

Resumen: La mayoría de los procesos que convierten biomasa a combustibles líquidos comienzan con un proceso de pirólisis seguido de craqueo catalítico para mejorar los bioaceites líquidos resultantes. Si bien la cinética y los mecanismos de descomposición para la pirólisis de biomasa han sido ampliamente estudiados, pocos estudios se han enfocado sobre el uso de los bioaceites generados en el proceso de pirólisis, que involucran menores tasas de polución que otras alternativas energéticas. La conversión termoquímica de biomasa (pirólisis, gasificación, combustión) es una prometedora alternativa energética no nuclear con vistas a un futuro próximo. En este trabajo se presenta un Proyecto de Tesis Doctoral registrado en el Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnologías del Medio Ambiente y Procesos de la Universidad de León que involucra, además de a ésta, a las Universidades de Extremadura y de Calgary (Canadá), así como a la Academia Básica del Aire. Se centra en el aprovechamiento de bioaceites pirolíticos obtenidos a partir de diferentes biomasa para el estudio de mezclas con queroseno en motores a reacción y en turbinas de gas. Se incluyen resultados de pruebas sobre motor a reacción a escala del mencionado Proyecto, previas a la optimización del biocombustible extraído.

Palabras clave: Biocombustibles. Propulsión. Sostenibilidad. Energías Renovables. Cogeneración.

1. Introducción

El agotamiento de los yacimientos de petróleo, el continuo crecimiento del consumo de energía motivado por el desarrollo de economías emergentes (China, India, países del Este...), problemas geopolíticos en los países productores de petróleo, la subida continua del precio del petróleo y gas natural, así como graves problemas medioambientales derivados de la utilización de estos combustibles fósiles, han motivado la aparición en la UE y en muchos países desarrollados de excelentes incentivos para el desarrollo de recursos de energía renovables. La biomasa es, precisamente, uno de los recursos renovables que permite la obtención de biocombustibles.

Además de la considerable autonomía en cuanto al consumo energético que aportaría a España el uso de biocombustibles de fabricación propia, la posible implicación del Ministerio de Defensa en el desarrollo de biocombustibles para autoabastecimiento y desempeño de sus funciones de una manera sostenible demostraría un compromiso indiscutible con el medio ambiente, mejorando la imagen pública relativa a los recursos invertidos en Defensa y Seguridad.

La mayoría de los procesos de transformación de biomasa en combustibles líquidos comienzan con la pirólisis (descomposición térmica de un material en atmósfera inerte resultando tres fracciones: sólida, líquida y gaseosa), seguida por craqueo catalítico para mejorar los bioaceites líquidos resultantes. La cinética y los mecanismos de descomposición para la pirólisis de biomasa y sus constituyentes han sido ampliamente estudiados. En contraste, pocos estudios se han enfocado sobre el uso de catalizadores para el craqueo de biomasa para generar productos químicos de interés, así como sobre el uso de los bioaceites generados en el proceso de pirólisis. Además, la industria conservante de la madera en los países desarrollados está interesada en encontrar productos derivados de los residuos a bajo coste y medioambientalmente aceptables, que puedan ser sustitutos de los combustibles actuales o sean sustancias químicas de interés industrial [2]. La descomposición pirolítica de madera produce un gran número de productos químicos, algunos de los cuales pueden ser usados como sustitutos de los combustibles convencionales.

El bioaceite pirolítico, como combustible limpio, tiene varias ventajas medioambientales sobre los combustibles fósiles. Los bioaceites son CO₂/GHG neutros. Por tanto, pueden generar créditos de CO₂. No producen prácticamente emisiones de SO_x ya que las plantas de biomasa contienen insignificantes cantidades de azufre. El bioaceite, por tanto, no está sujeto a tasas de SO_x. Los bioaceites generan menos del 50% de las emisiones de NO_x que el diésel en una turbina de gas.

Por otra parte, el bioaceite producido localmente puede ser generado en países con grandes volúmenes de residuos orgánicos. Así, los biocombustibles son más limpios y son causa de menores tasas de polución [3,4]. La conversión termoquímica de biomasa (pirólisis, gasificación, combustión) se presenta como una prometedora forma de energía no nuclear en un futuro próximo [5].

Los resultados obtenidos de los análisis del bioaceite obtenido nos dan una idea en línea con lo esperado, por lo que proseguimos con la prueba en una aplicación práctica como es un motor a reacción para ensayos. Dicho motor, nos valdrá para poder comparar los datos obtenidos usando diferentes mezclas de bioaceite con queroseno (al 5%, 10% y 20%) con el patrón de medida que será el rendimiento obtenido utilizando 100% queroseno.

Los resultados obtenidos (previos al resto de pruebas de exigencias fisico-químicas) nos dan una idea de la posibilidad de sustituir parcialmente el queroseno por bioaceite pirolítico, ya que el rendimiento práctico es similar al que se obtiene utilizando 100% queroseno. Además también cabría la posibilidad de utilizar el bioaceite en mecanismos que requieren muchas menos exigencias en cuanto al combustible a utilizar, como son las calderas de calefacción y ACS (mayores tolerancias de los mecanismos y condiciones de funcionamiento menos hostiles) por lo que se podría reducir el total de emisiones contaminantes de otros aprovechamientos.

Se midieron diferentes parámetros durante las pruebas:

-*Empuje*: el motor construido no dispone de tobera, por lo que no está optimizado para esta prueba pero sí que nos dará una idea de la posible diferencia de rendimiento.

-*Presión de combustible*: al utilizar un inyector continuo, el régimen de funcionamiento del motor se puede variar dependiendo de la presión de combustible, lo que está en relación directa con el caudal de combustible que se introduce al motor, y en consecuencia a la potencia que se obtiene. Este parámetro se va a tener en cuenta para garantizar que durante las pruebas con las diferentes mezclas se mantiene el consumo y las condiciones de funcionamiento, para poder valorar las diferencias de rendimiento del motor.

-*Presión del compresor*: teniendo el dato del consumo de combustible, divergencias en cuanto a la presión que está produciendo el compresor (a su vez movido por la turbina que obtiene su impulso gracias a al combustible quemado) nos indicarían una deficiencia en la combustión, yendo en línea con variaciones del empuje total al estar relacionados ambos parámetros con el consumo de aire del motor.

-*Temperatura de gases de escape (EGT Exhaust Gas Temperature)*: Nos da una idea de la combustión del motor, y sus variaciones indicarán diferencias en la relación aire-combustible óptima. Además, una EGT alta podría indicar desgaste interno de compresor y/o turbina, pero al realizarse las pruebas sobre un mismo dispositivo descartamos esta opción.

Además del estudio en cuestión, en el supuesto de que las pruebas de extracción con CO₂ supercrítico fuesen satisfactorias ello daría lugar a una futura línea de investigación para obtener el biocombustible de un modo más limpio y eficiente.

2. Objetivos y Metodología

El objetivo principal de este estudio es la prueba del bioaceite en el motor a reacción. Una vez obtenido el bioaceite pirólítico, se realiza la extracción de la fracción que nos es de interés con disolventes orgánicos (éter etílico y acetato de etilo), y se procede a realizar una valoración previa a la prueba real en el motor a escala de laboratorio. El procedimiento experimental seguido en el laboratorio se puede ver en la Figura 1.

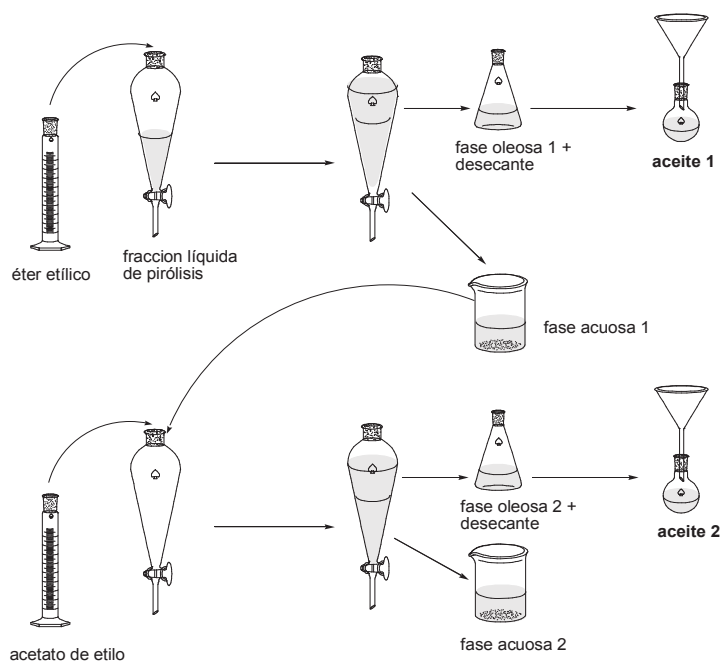


Figura 1. Procedimiento experimental de la extracción con disolventes orgánicos

En cuanto a los ensayos en el motor a reacción a escala, éstos se realizan una vez el motor ha alcanzado las condiciones óptimas de funcionamiento, en el mismo día para que no influyan las posibles variaciones atmosféricas. Se disponen de cuatro recipientes con 4 litro cada uno de combustible, el primero de ellos es queroseno al 100%, el resto son mezclas de queroseno y bioaceite al 5%, 10% y 20%.

Primeramente se arranca el motor y se le permite llegar a la temperatura de funcionamiento, monitorizando siempre las presiones y temperaturas del sistema de lubricación para asegurar que no va a producir fallos mecánicos. Una vez en ese punto, se pone a máximo régimen (máxima presión de combustible) y se mide la presión del compresor, el empuje y la temperatura de los gases de escape. Estas mismas mediciones se hacen con cada una de las mezclas restantes, para poder analizar las diferencias de rendimiento resultantes.

3. Resultados obtenidos

3.1. Obtención de biocombustible y análisis previo.

Como resultado de la pirólisis de cardo y hueso de aceituna a 700 °C durante una hora se obtiene más de una tercera parte en masa de bioaceites del total pirolizado. Esta fracción líquida obtenida se somete a un proceso de extracción con disolventes orgánicos para separar la fase oleosa (bioaceite, fase de interés) de la fase acuosa, la cual se encuentra en elevada proporción en dicha fracción líquida. Se obtiene un rendimiento del 34.72%. Se estudiará la posibilidad de realizar la extracción con CO₂ supercrítico para mejorar el rendimiento de extracción global a la vez de minimizar la presencia de disolventes en el producto.

3.2. Ensayos en motor a reacción.

Para llevar a cabo el estudio de los diferentes combustibles se realizan ensayos en un motor a reacción de fabricación propia (Figura 2) con compresor y turbina centrífugos (turbocompresor de automoción), encendido de chispa continua y alimentación de combustible por inyector mecánico. La cámara de combustión (Figura 3) se ha diseñado con dos zonas diferenciadas para permitir una mayor riqueza de combustible en la zona central con el objetivo de mantener la llama, y una zona de circulación de aire del compresor exterior a dicha zona central para refrigerar las paredes y permitir un caudal total de aire mayor así como una mezcla progresiva de aire con la mezcla enriquecida antes de la entrada a la turbina. El mapa del compresor utilizado se muestra en la Figura 4.



Figura 2. Motor a reacción a escala para ensayos.



Figura 3. Detalle zonas cámara de combustión.

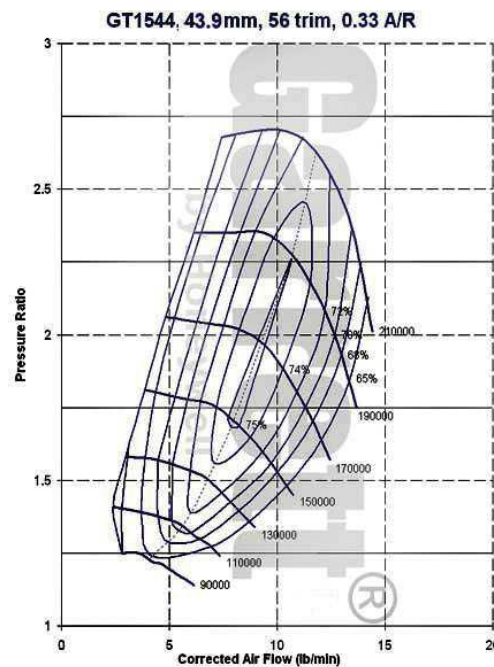


Figura 4. Mapa del compresor utilizado.

Las pruebas se han realizado con unas condiciones de temperatura ambiente de 20 °C y presión atmosférica 1015 mbar, con el motor en ligera pendiente para evitar desplazamientos excesivos (motivo del bajo empuje, además de no poseer tobera específica para optimizar dicho parámetro). La presión de combustible a máxima potencia ha sido de 6 bar, lo que da un caudal de combustible de 262.5 cc/min para el inyector utilizado. Teniendo el combustible una densidad de 0.82 kg/l, el caudal en unidades de masa es 0.0036 kg/s en unidades del SI.

Con los datos anteriores y los recogidos en las pruebas (Tabla 1), obtenemos que la eficiencia del turbocompresor se mantiene en el entorno del 74%, con una velocidad de giro rondando las 200.000 rpm y un caudal de aire cercano a 12 lb/min, que equivale a 0.091 kg/s en unidades del SI. Para tomar referencias, estos valores corresponden a una potencia aproximada de 100cv para el uso de este turbocompresor en automoción.

Tabla 1. Resultados pruebas en motor a reacción, a 20 °C y 1,015 bar atmosféricos.

Porcentaje Bioaceite	0 %	5 %	10 %	20 %
Presión Compresor	1,65 bar	1,65 bar	1,60 bar	1,60 bar
EGT	803 °C	803 °C	801 °C	800 °C
Empuje	475 g	475 g	470 g	465 g

Una vez realizadas las pruebas se procede al desmontaje para comprobar el estado de los diferentes elementos de interés, de lo que se pueden sacar las siguientes CONCLUSIONES:

- No quedan residuos carbonosos en la parte caliente del motor (Figura 5).
- La bujía sale limpia y color café, indicando una correcta combustión de la mezcla (Figura 6).
- El filtro de la bomba de combustible contiene impurezas debido a la poca miscibilidad del bioaceite (Figura 7).
- Los resultados a priori son satisfactorios, con un rendimiento similar al obtenido con queroseno puro, incluso con la mezcla con un porcentaje de bioaceite del 20% sobre el total (Tabla 1).

Obtenidos estos resultados, la siguiente investigación que se llevará a cabo será una mejora de la miscibilidad del bioaceite mediante el uso de tensioactivos, se hará un estudio para realizar la extracción de la fracción de interés con CO₂ supercrítico para optimizar el proceso, y se realizará un craqueo catalítico a la fracción restante más pesada para obtener así mayor cantidad de bioaceite dentro del rango de puntos de destilación que nos son de interés del total de la masa pirolizada, lo que mejorará el rendimiento global de la extracción.

Además, se comprobará la viabilidad del uso de bioaceite pirolítico en motores diesel y calderas, dispositivos normalmente con menores exigencias en cuanto a propiedades del combustible que los motores a reacción.



Figura 5. Detalle turbina sin residuos carbonosos.



Figura 6. Bujía color café indicando una correcta combustión.



Figura 7. Filtro de baja presión de la toma de bomba de combustible con restos de aceite.

Agradecimientos

Los autores desean hacer constar su agradecimiento al Dr. Nader Mahinpey, del Departamento de Ingeniería Química y del Petróleo de la Universidad de Calgary (Alberta, Canadá), por su interés y predisposición en que el Doctorando desarrolle alguna fase del presente trabajo en el seno del Grupo de Investigación *Energy and Environment Research Group*, bajo su dirección en la *Schulich School of Engineering*. Asimismo, a D^a Melissa Valdés Vázquez, de la Agregaduría de Educación de la Embajada de España en Canadá, por el inestimable apoyo institucional en lo concerniente a las relaciones con el entorno universitario de la provincia de Alberta. Finalmente, a la Academia Básica del Aire del Ejército del Aire por su predisposición y colaboración efectiva para facilitar la planificación y el desarrollo de este Proyecto.

Referencias

1. Mohan, D.; Pittman, C.U. Jr; Steele, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy and Fuels* **2006**, *20*, 848-889.
2. Gutiérrez Bravo, J.; Suárez Megías, R.; Galán González, C. A.; González González, J. F.; González Valenzuela, F. J. Analysis and extraction of bio-oil by biomass pirólisis: an alternative fuel source for jet engines and gas turbines; International Congress on Water, Waste and Energy Managemen, Oporto, Portugal, **2014**; pp 244.
3. Maniatis K., Buekens A, Bridgwater A.V., Eds.; Elsevier Applied Science: Londres, Reino Unido, **1989**; pp. 326-333.
4. Putun, E. *Energy Sources* **2002**, *24(3)*, 275-285
5. Gutiérrez Bravo, J.; Galán González, C. A.; González González, J. F.; García Pérez, A. I.; Gonzalo de Grado, J. Proyecto de aprovechamiento de bioaceite pirolítico en motores a reacción y turbinas de gas: aspectos preliminares; Congreso en DESE I+D, Madrid, España, **2013**.
6. Bridgwater, A.V. *Chem. Eng. J.* **2003**, *91*, 87-102.
7. Amen-Chen, C.; Pakdel, H.; Roy, C. *Biomass Bioenergy* **2001**, *79*, 277-299.
8. Boocock, D.G.B.; Konar, S.K.; Glaser, G. The formation of petrodiesel by the pyrolysis of fatty acid methyl esters over activated alumina. In *Progress in Thermochemical Biomass ConVersion*; Bridgwater, A.V., Ed.; Blackwell Science: Londres, Reino Unido, 2001; pp. 1525-1539.
9. Lang, X.; Dalai, A.K.; Bakhshi, N.N.; Reaney, M.J.; Hertz, P.B. *Bioresour. Technol.* **2001**, *80 (1)*, 53-62.
10. Ikura, M.; Stanciulescu, M.; Hogan, E. *Biomass Bioenergy* **2003**, *24*, 221-232.
11. Strenziok, R.; Hansen, U.; Kunstner, H. Combustion of bio-oil in a gas turbine. In *Progress in Thermochemical Biomass ConVersion*; Bridgwater, A.V., Ed.; Blackwell Science: Londres, Reino Unido, 2001; pp. 1452-1458.
12. Chiaramonti, D.; Bonini, M.; Fratini, E.; Tondi, G.; Gartner, K.; Bridgwater, A.V.; Grimm, H.P.; Soldaini, I.; Webster, A.; Baglioni, P. *Biomass Bioenergy* **2003**, *25 (1)*, 85-99.
13. Chiaramonti, D.; Bonini, M.; Fratini, E.; Tondi, G.; Gartner, K.; Bridgwater, A.V.; Grimm, H.P.; Soldaini, I.; Webster, A.; Baglioni, P. *Biomass Bioenergy* **2003**, *25 (1)*, 101-111.
14. Guéhenneux, B.G.P.; Brothier, M.; Poletiko, C.; Boissonnet, G. *Fuel* **2005**, *84 (6)*, 733-739.
15. Elliott, D.C.; Sealock, J.L.J. Low-temperature gasification of biomass under pressure. In *Fundamentals of Thermochemical Biomass ConVersion*; Overend, R.P., Milne, T.A., Mudge, L.K., Eds.; Elsevier: Londres, Reino Unido, 1985; pp. 937-950.
16. Delgado, J.; Aznar, M.P.; Corella, J. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1997**, *36*, 1535-1543.
17. Antal, M.J. Jr. Synthesis gas production from organic wastes by pyrolysis/steam reforming. In *Energy from Biomass and Wastes*; Klass, D.L., Ed.; Institute of Gas Technology (IGT): Chicago, Estados Unidos, 1978, pp. 495-524.
18. Antal, M.J. Jr. A review of the vapor phase pyrolysis of biomass derived volatile matter. In *Fundamentals of Thermochemical Biomass ConVersion*; Overend, T.A., Milne, R.P., Mudge, L.K., Eds.; Elsevier: Nueva York, Estados Unidos 1985; pp. 511-537.
19. Gañán, J.; Abdulla, Al-K.; Miranda, A.B.; Turegano, J.; Correia, S.; Cuerda, E.M. *Renewable Energy* **2005**, *30 (11)*, 1759-1769.
20. Tomishige, K.; Asadullah, M.; Kunimori, K. *Catal. Today* **2004**, *89 (4)*, 389-403.
21. Hanaoka, T.; Inoue, S.; Uno, S.; Ogi, T.; Minowa, T. *Biomass Bioenergy* **2005**, *28 (1)*, 69-76.
22. The Sixth Italian Conference on Chemical and Process Engineering, June 8-11, 2003, Pisa, Italia (available at <http://www.aidic.it/icheap6>).
23. Huber, G.W.; Chheda, J.N.; Barrett, C.J.; Dumestic J.A. *Science* **2005**, *308*, 1446-1450.