Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso

Biomass Gasification for Power Generation Internal Combustion Engines. Process Efficiency

Dr. René Lesme-Jaén, Dr. Luis Garcia-Faure, Dr. Luis Oliva-Ruiz, Dr. Juan Pajarín-Rodríguez, Ing. Dennis Revilla-Suarez

Universidad de Oriente, Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Cuba. lesme@fim.uo.edu.cu

Resumen

La biomasa constituye una de las fuentes renovables de energía de mayores perspectivas a nivel mundial, por sus potencialidades y su menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles. Mediante diferentes procesos y tecnologías de conversión energética es posible obtener combustibles en forma sólida, líquida y gaseosa a partir de cualquier tipo de biomasa. En éste trabajo se presenta la evaluación de la eficiencia térmica y global de la instalación de gasificación en la Empresa Forestal Integral de Santiago de Cuba, proyectada para la generación de electricidad a partir de los residuos de la industria forestal. El gasificador es un reactor downdraft, modelo COMBO-80 de fabricación Hindú y el motor (diesel) modelo Leyland modificado para trabajar con gas pobre. La evaluación fue realizada para diferentes cargas (potencia eléctrica generada) del motor a partir de mediciones experimentales del flujo y composición del gas alimentado al motor. Los resultados muestran que el motor trabaja con una eficiencia térmica en un rango de 20-32 % con una eficiencia global entre 12-25 %.

Palabras clave: biomasa, gasificación, generación de electricidad, motores de combustión interna.

Abstract

Biomass is a renewable energy sources worldwide greater prospects for its potential and its lower environmental impact compared to fossil fuels. By different processes and energy conversion technologies is possible to obtain solid, liquid and gaseous fuels from any biomass.In this paper the evaluation of thermal and overall efficiency of the gasification of Integral Forestry Company Santiago de Cuba is presented, designed to electricity generation from waste forest industry. The gasifier is a downdraft reactor, COMBO-80 model of Indian manufacturing and motor (diesel) model Leyland modified to work with producer gas. The evaluation was conducted at different loads (electric power generated) of the motor from experimental measurements of flow and composition of gas supplied to the engine. The results show that the motor operates with a thermal efficiency in the range of 20-32% with an overall efficiency between 12-25 %.

Keywords: biomass gasification. electricity generation, internal combustion engines.

INTRODUCCION

La biomasa ha sido presentada como una alternativa promisoria de energía, no solo por su potencial mundial, sino porque es una fuente de CO_2 neutral, su termo conversión genera bajas emisiones de SO_2 y NO_X y es la única fuente de energía renovable capaz de sustituir a los combustibles fósiles en todos sus mercados de energía. En el mundo el potencial de energía a partir de la biomasa se estima en 70 Gtep/año y en la actualidad ella proporciona entre el 7-14 % de la energía consumida, con posibilidades de incremento entre un 6-9 % en los próximos 20 años. [1]

Entre las fuentes de energía a partir de la biomasa, los residuos de los aserraderos son potencialmente atractivos económicamente, ellos están concentrados en un determinado depósito y su costo de transportación es relativamente bajo. Se estima que durante el proceso de elaboración de la madera se obtienen 0,50 m^3 de residuos/m^3 de madera en bolos. [2, 3]

De los procesos de conversión térmica de la biomasa la gasificación presenta grandes perspectivas, ya que ofrece entre otras ventajas, una mayor eficiencia de conversión en comparación con la pirolisis y la combustión. En la práctica la gasificación puede convertir de un 60 % a un 90 % de la energía de la biomasa en energía del gas. [4]

La gasificación de la biomasa es la conversión térmica de la misma en un gas, el cuál puede utilizarse para la producción de electricidad con el empleo de motores de combustión interna con un determinado nivel de eficiencia, que depende de las características de la biomasa y los motores utilizados.

El gas pobre, resultado de la gasificación de biomasa con aire tiene un elevado contenido de sustancias volátiles combustibles (CO, CH_4 y H_2), valor calórico bajo entre (4-7 MJ/Nm^3), una alta estabilidad al encendido y un satisfactorio número de

metano, pudiendo ser utilizado en motores de combustión interna, el esquema tecnológico se presenta en la figura 1. [5,6]

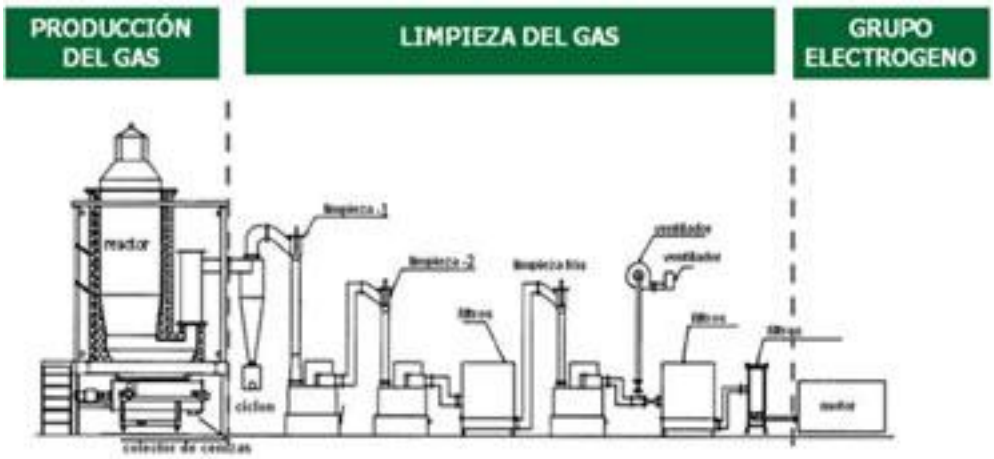

Figura 1. Esquema general de la tecnología

El gas se produce en un reactor (gasificador), sus características dependen fundamentalmente del tipo de biomasa utilizada y del rango de potencia eléctrica. Este gas es sometido a un proceso de limpieza y luego suministrado al motor de combustión interna. Para la generación de electricidad a pequeña (< 1MW) los reactores más utilizados son los gasificadores downdraft, ellos son capaces de garantizar los requerimientos de calidad del gas a suministrar al motor. [7]

En este trabajo se realiza una evaluación experimental de la eficiencia de conversión de la energía química de la biomasa en electricidad de la tecnología de gasificación y generación de electricidad, con el empleo de motores de combustión interna a partir de mediciones experimentales realizadas a una instalación que trabaja con residuos de la industria de la madera.

La generación de electricidad utilizando gas de la biomasa como combustible en motores de combustión interna es una tecnología en estado comercial. Los motores usados pueden ser de encendido por chispa o de motor diesel.

Las investigaciones realizadas para la evaluación del rendimiento térmico en los motores de combustión interna que funcionan con gas pobre para generar electricidad, muestran diferentes resultados, en dependencia de las características de los motores utilizados, en la tabla 1 se presentan los indicadores.

Tabla 1
Indicadores de eficiencia de diferentes motores de combustión interna trabajando con gas pobre

Biomasa	Motor/ rpm	RC	Gas.(%)	MM	Pot (kW)	PI (APMS)	Ppo (%)	η_T (%)	η_G (%)
Madera [8]	Diesel/1500	11,5:1	100	SIG	12-16[1]	35	nd	28-32	21-24[2]
Madera [9]	Diesel/1500	17:1	100	SIG	2,3[3]	10	20	19,05[4]	nd
Madera[10]	Diesel/ nd	nd	100	SIG	15-20[1]	nd	20	28[4]	25[2]
Cáscara de arroz [11]	Otto /1800	12:1	100	MGN	40,7[4]	30	37,38	nd	nd
Cáscara de coco [12]	Diesel/1500	18,5:1	81	No	11,44[3]	nd	21	14,7[5]	11,69[2]
Madera[13]	Diesel/1500	17:1	100	SIG	17,5[1]	6	16,7[6]	nd	16,6[7]
Madera[14]	Diesel/1500	17,5:1	65	No	4[3]	27	20	27	nd
			60	SIG				24	nd
Madera[15]	Diesel/1800	12,5:1	100	SIG	5,3[1]	15	47	nd	nd
Madera[16]	Gas/ 1500	12:1	100	No	75	28	14	20,7	-
Madera[17]	Gas/ 1200 3400	10:1	100	No	3,55-3,68	-	6-9	23,2-26,2	-
Madera[18]	Diesel/1500	17,5:1	35-70	SIG	4,2	19-27	20	22,25-24,25	-
RPF [19]	Gas/ 1800	-	100	No	20	-	34	22	-
Madera[20]	Gas/ 1500	11:1	100	No		25-35	-	34	-
Madera[21]	Diesel/1500	17,5:1	100	SIG	2.5	12-15	38,12	18-22	-
Madera[22]	Gasolina/ 1800	9,7:1	100	No	9,60-13,10	-	54-67	20,3-29,5	16-25
Madera[23]	Diesel/1500	17,5:1	10-72	SIG	5,2	23	-		16-18
RIAO [24]	Gas/ 1500	12:1	100	No	70	-	30	19,5	-

*Los números y abreviaturas de la tabla anterior se refieren a los parámetros siguientes:

(1) Potencia eléctrica, nd. No declarado, (2) Biomasa-electricidad, (3) Potencia al freno, (4) En el eje, (5) Motor-generador, (6) Potencia mecánica, (7) Biomasa-salida en el eje, RC. Relación de compresión, MM. Modificaciones en el motor, SIG. Sistema de ignición, PI. Punto de ignición, APMS. Antes del punto muerto superior, ηT. Eficiencia Térmica, ηG. Eficiencia Global. Ppot. Pérdida de potencia. RDF. Mezclas de materiales plásticos, textiles y cerámicos. RIAO. Residuos de la industria del aceite de olivo.

Las aplicaciones comerciales de la tecnología se localizan en un rango de potencia menor de 1 MW. Los motores utilizados pueden ser de ignición por chispa y Diesel. En los motores de ignición por chispa el gas pobre puede sustituir el 100 % del combustible. La principal modificación a realizar es en el tiempo o punto de ignición a fin de lograr que la presión máxima de combustión se alcance entre 10 y 12 grados APMS y con ello mejores desempeños del motor, dada la mayor velocidad de la llama del gas pobre con respecto al gas natural. [25]

Los motores diesel operan a mayores relaciones de compresión, su operación con gas pobre debe ser dual (sustitución de hasta el 85 % del Diesel). La ventaja radica en su flexibilidad, en caso de un mal funcionamiento del gasificador es posible un cambio inmediato de combustible, operando el motor totalmente con diesel. Cuando se quiere utilizar un motor diesel con gas pobre (100%) hay que implementar un mezclador, un sistema de ignición por chispa y modificarse el ángulo de avance de la ignición. [26]

Basado en lo planteado anteriormente, el objetivo de este trabajo es la evaluación de la eficiencia térmica y global de la instalación de gasificación en la Empresa Forestal Integral de Santiago de Cuba, proyectada para la generación de electricidad a partir de los residuos de la industria forestal.

MATERIALES Y METODOS

Equipamiento

La evaluación se llevó a cabo en la instalación de gasificación para generar electricidad a partir de los residuos de la elaboración de la madera de la Empresa Forestal Integral Gran Piedra Baconao de Santiago de Cuba. Las características básicas de la biomasa gasificada se recogen en la tabla 2.

Tabla 2
Composición elemental de la biomasa (pino) en base seca. [27]

Biomasa	**C**	**H**	**O**	**N**
Pino (%)	**47,95**	**6,03**	**45,00**	**1,02**

En esta instalación el gas es producido en un reactor downdraft (figura 2), modelo COMBO-80, con una temperatura de trabajo entre 1050 -1100 ^{0}C, el mismo posee un sistema automático de alimentación de biomasa y descarga húmeda de cenizas.

Figura 2. Gasificador downdraft con sistema de limpieza húmeda (ciclón, scrubber)

El gas salido del reactor a una temperatura entre 400-500 ^{0}C se somete a un proceso de limpieza húmeda (ciclón-scrubber), disminuyendo su temperatura hasta 40-50 ^{0}C. Luego con el objetivo de eliminar otros contaminantes, se somete a un proceso de limpieza seca en un sistema compuesto por un filtro grueso, un filtro fino activo y otro pasivo, y un filtro de seguridad. (figura 3)

Figura 3. Sistema de limpieza seca.

La unidad generadora de electricidad está formada por un motor y un generador eléctrico. El generador, directamente acoplado al motor, es trifásico, gira a 1800 rpm de 220 V y 60 Hz. (figura 4)

Figura 4. Unidad generadora de electricidad

El motor diesel modelo Leyland fue modificado para trabajar con gas pobre mediante la implementación de un mezclador tipo Venturi y un sistema de encendido por chispa eléctrica, sus características técnicas aparecen en la tabla 3.

Tabla 3
Características técnicas del motor.

Modelo	**Ashok Leyland**
Revoluciones	1800
No. de Cilindros	6
Cilindrada	2623 cm^3
Diámetro del pistón	76,2 mm
Carrera	95,7 mm
Potencia Nominal	90.2 kW (Diesel)
Relación de compresión	9:1

Técnica experimental

La instalación se evaluó para tres condiciones de trabajo, en cada caso se midió la potencia eléctrica generada, el flujo y la composición del gas suministrado al motor. La carga eléctrica se registró a través de un Wattímetro situado en el panel de control de la instalación, el flujo de gases con un tubo Venturi situado a la entrada del motor y la composición del gas con un analizador de gases LANDTEC modelo GEM 2000 PLUS.

El consumo de biomasa del gasificador se obtuvo mediante un modelo de equilibrio termodinámico no estequiométrico del gasificador desarrollado a partir de la ecuación general de la gasificación de la biomasa con aire y los resultados de balance molares de cada uno de los elementos que la conforman [27, 28, 29].

El flujo de aire suministrado al motor se determinó a través de la expresión general de la combustión del gas pobre, teniendo en cuenta su composición y los resultados de balance molares de cada uno de los elementos que conforman la mezcla aire combustible [30].

RESULTADOS Y DISCUSION

Composición, flujo gas y consumo de de biomasa en le gasificador

En la tabla 4 se presenta los valores promedios de tres réplicas de la composición, el flujo de gas (Mgases) y el consumo de biomasa (Mbio) del gasificador para las tres condiciones de trabajo evaluadas (Pele)

Tabla 4
Mediciones experimentales y resultados del modelo termoquímico

No	**Potencia Eléctrica (Pele) = 5 kW**						
1	**Composición del gas, (%v)**					**Mgases (kg/h)**	**Mbio (kg/h)**
2	CO	CO_2	CH_4	N_2	H_2		
3	21	13	3	46	16	56,32	29,48
No	**Potencia Eléctrica (Pele) = 20 kW**						
1	**Composición del gas, (%v)**					**Mgases (kg/h)**	**Mbio (kg/h)**
2	CO	CO_2	CH_4	N_2	H_2		
3	20	12	2	46	18	7,7,33	30,28
No	**Potencia Eléctrica (Pele) = 40 kW**						
1	**Composición del gas, (%v)**					**Mgases (kg/h)**	**Mbio (kg/h)**
2	CO	CO_2	CH_4	N_2	H_2		
3	19	10	2	50	18	155,03	60,00

Los resultados muestran que la composición del gas varia con las condiciones de trabajo del gasificador, pero sus valores están en correspondencia con los reportados en la literatura de referencia sobre el tema [31].

Eficiencia térmica del motor

Este indicador evalúa el proceso de transformación de energía de la mezcla combustible en electricidad y puede ser evaluada por la siguiente expresión:

$$\eta_T = \frac{Potencia\,Eléctrica}{HV_M x M_{mezcla}} \qquad (1)$$

donde
M_{mezcla}. Flujo volumétrico de la mezcla aire combustible (Nm^3/s), se determina como la suma del flujo de gases y el de aire que se le suministra al motor (ecuación 2)

$$M_{mezcla} = M_{gases} + M_{aire} \qquad (2)$$

HV_M. Densidad energética de la mezcla aire-combustible, kJ/Nm^3 (ecuación 3) [31].

$$HV_m = \frac{10768(Y_{H_2}) + 12696(Y_{CO}) + 35866(Y_{CH_4})}{1 + 2.38(Y_{H_2}) + 2.38(Y_{CO}) + 9.53(Y_{CH_4})} \qquad (3)$$

En esta expresión YH2, YCO, YCH4 son las concentraciones (%v) de hidrógeno, monóxido de carbono y metano en el gas pobre.

Eficiencia global de la instalación

La eficiencia global evalúa el proceso de transformación de la energía de la biomasa en electricidad (ecuación. 4)

$$\eta_G = \frac{\text{Potencia Eléctrica}}{M_{bio} \text{ x} PCI_{bio}} \qquad (4)$$

donde
PCIbio. Poder calórico bajo de la biomasa (16,95 MJ/kg)

Los resultados de los cálculos de la eficiencia térmica del motor, la densidad energética del gas y la eficiencia global de la instalación se muestran en la tabla 5.

Tabla 5
Eficiencia del motor y la instalación

Pele (kW)	HVm (MJ/Nm^3)	Mmezcla (Nm^3/s)	ηT (%)	ηG (%)
5	2,05	0,024	10,.2	3,6
20	2,45	0,033	24,0	14,0
40	2,40	0,065	25,7	14,2

Los resultados muestran que la densidad energética promedio del gas pobre es de 2,3 MJ/Nm^3, ligeramente inferior a la del gas natural (3,32 MJ/Nm^3) y el poder calorífico bajo del diesel, lo cual constituye la causa principal de la pérdida de potencia del motor de gas o diesel cuando se utiliza con gas pobre. [32].

Los valores de eficiencia térmica y global obtenidos están en correspondencia con los reportados en evaluaciones realizadas a otros tipos de motores.

La eficiencia térmica varió entre 10,2 y 25,7 %, manteniéndose de forma estable (24,0-25,7 %), en un amplio rango de carga (20-40 kW), comportamiento similar experimentó la eficiencia global (14,0-14,2 %), lo cual es particularmente económico para aquellos instalaciones de generación de electricidad que operan como sistemas aislados.

CONCLUSIONES

1. El gas pobre presenta propiedades combustibles inferiores a la del gas natural (densidad energética), no obstante puede ser utilizado en motores de combustión

interna de forma satisfactoria, esperándose una reducción de la potencia del motor con respecto a los combustibles tradicionales proporcional a la disminución de su densidad energética. En el caso del motor Leyland P76, la reducción fue de 42% (40 kW) con respecto al Diesel (90,2 kW)

2. La mayor parte de los motores utilizados para trabajar con gas pobre son motores diesel a los cuales se le implementa se le realizan modificaciones. En el caso del motor Leyland P76 se implementó un mezclador tipo Venturi y un sistema de encendido por chispa eléctrica.

3. La evaluación del desempeño de los motores de combustión interna accionados con gas pobre para la generación de electricidad, muestran que ellos trabajan con una eficiencia térmica en un rango de 20-32 % y una eficiencia global entre 12-25 %. En el caso del motor Leyland P76 que trabaja con gas pobre producto de la gasificación de residuos de la industria forestal posee una eficiencia térmica de 25,7 % y una eficiencia global de 14,2 % en su punto de operación (40 kW).

BIBLIOGRAFIA

1. DEMIRBAS M.F.; BALAT, M.; BALAT, H. "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development". *Energy Convers Manage*. 2009, vol. 50, pp.1746–1760.

2. LESME JAÉN, R.; OLIVA RUIZ, O. "Potencial energético de los residuos de la industria de la madera en el aserrío El Brujo de la Empresa Gran piedra Baconao, Santiago de Cuba". *Revista Tecnología Química*. 2010, vol. 30, núm. 1, pp. 97-101.

3. LESME JAÉN, R.; OLIVA RUIZ, O. "Coeficientes de resíduos de la industria forestal". Revista Tecnologia Química. 2006, vol. 26, núm. 3. pp. 26-29.

4. ARJAN, F.; KIRKELS, Geert; VERBONG, P. J. "Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2011, vol. 15, pp. 471–481.

5. MARTÍNEZ, J. D.; VIERA ANDRADE, R.; SILVA LORA, E.; LESME JAÉN, R. "Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor". *Biomass and Bioenergy XXX.* 2011, pp. 1-17.

6. MUÑOZ, M.; MORENO, F.; MOREA ROY, J.; RUIZ, J.; ARAUZO, J. "Low Heating Value Gas on Spark Ignition Engines". *Biomass and Bioenergy*. 2000, vol. 18, pp. 431-43.

7. GARCIA, P.; OTERO, J. "Gasificación de Biomasa. Revisión y descripción de las tecnologías". *Energía.* núm. 1, 2000.

8. SHASHIKANTHA, B.; KHAIRNAR, P.; KAMAT, P. 2Development and Performance Analysis of a 15 kWe Producer Gas Operated SI Engine". 1993, pp. 219-231.

9. RAMACHANDRA, A. "Performance Studies on a Wood Gas Run IC Engine". 1993, pp. 213-218.

10. HENRIKSEN, U.; AHRENFELDT, J.; JENSEN, T. K.; GØBE, B.; BENTZEN, J. D.; HINDSGAUL, C.; SØRENSEN, L. H. "The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier". *Energy.* vol. 31, pp. 1542–1553. 2006.

11. MURARO, W. *Avaliação do Funcionamento de Motor ICE com Gás de Baixo Poder Calorífico Proveniente da Gaseificação de Casca de Arroz, Dissertação de Mestrado*. UNICAMP. 2006, 86 p.

12. BHATTACHATYA, S. C.; HLA, S. S.; PHAM, H. L. "A Study on a Multi- Stage Hybrid Gasifier-Engine System". *Biomass and Bioenergy.* vol. 21, pp. 445-460. 2001.

13. SRIDHAR G., P. J.; PAUL, P. J.; MUKUNDA, H. S. "Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel-an experimental analysis". *Biomass and Bioenergy.* vol. 21, pp. 61–72. 2001.

14. AHRENFELDT, J.; Henriksen, U.; SCHRAMM, J. *Experimental on Wood Gas Engines. The Technical University of Denmark*. 40 p. 2000.

15. VIEIRA, R.; SILVA, E.; LESME, R. "Análise da operação de um gaseificador co-corrente de duplo estágio acoplado a um motor de combustão interna de ignição por centelha*".* CIBIM, Potugal. 2011.

16. RAMAN, P.; RAM, N. K.; GUPTA, R. "A dual fired downdraft gasifier system to produce cleaner gas for power generation: Design, development and performance analysis". *Energy.* vol. 54, pp. 302-314. 2013.

17. TSIAKMAKIS, S.; MERTZIS, D.; DIMARATOS, A.; TOUMASATOS, Z.; SÂMARAS, Z. "Experimental study of combustion in a spark ignition engine operating with producer gas from various biomass feedstocks". *Fuels*. vol. 122, pp. 126-139. 2014.

18. BANAPURMATH, N. R.; TEWARI, P. G. "Comparative performance studies of a 4-stroke CI engine operated on dual fuel mode with producer gas and Honge oil and its methyl ester (HOME) with and without carburetor". *Renewable Energy.* vol. 34, pp. 1009–1015. 2009.

19. WOO LEE, J.; TAE, Y.; WOOK LEE, J.; HONG MOON, J.; JAE JEONG, H.; SHIN PARK, S.; WON, Y.; DO LEE, U. "Gasification of Mixed Plastic Wastes in a Moving-Grate Gasifier and Application of the Producer Gas to a Power Generation Engine". *Energy Fuels.* vol. 27, pp. 2092−2098. 2013.

20. PAPAGIANNAKIS, R. G.; RAKOPOULOS, C. D.; HOUNTALAS, D. T.; GIAKOUMIS, E. G. "Study of the performance and exhaust emissions of a spark-ignited engine operating on syngas fuel. Int. J." *Alternative Propulsion*. vol. 1, núm. 2/3, pp. 190-215. 2007.

21. TEWARI, P. G.; SUBRAHMANYAM, J. P.; GAJENDRA BABU, M. K. *Experimental Investigations on the Performance Characteristics of a Producer Gas Fuelled Spark Ignition Engine*. 2001.

22. LEE, U.; BALU, E.; CHUNG, J. N. "An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications". *Applied Energy.* vol. 101, pp. 699-708. 2013.

23. BIBHUTI, B. S.; NIRANJAN, S.; UJJWAL, K. "Effect of H_2:CO ratio in syngas on the performance of a dual fuel diesel engine operation". *Applied Thermal Engineering.* vol. 49, pp. 139-146. 2012.

24. VERA, D.; MENA, B.; JURADO, F.; SCHORIES, G. "Study of a downdraft gasifier and gas engine fueled with olive oil industry wastes". *Applied Thermal Engineering.* vol. 5, pp. 119-129. 2013.

25. HERNÁNDEZ, J. J.; SERRANO, C.; PÉREZ, J. "Prediction of the Autoignition delay time of producer gas from biomass gasification". *Energy & Fuels.* vol. 20, pp. 532-539. 2006.

26. RAMADHAS, A. S.; JAYARAJ, S.; MURALEEDHARAN, C. "Dual fuel mode operation in diesel engines using renewable fuels: Rubber seed oil and coir-pith producer gas". *Renewable Energy*. 2008, vol. 33, pp. 2077-2083.

27. REVILLA, D. *Evaluación teórico experimental de un gasificador downdraft modelo COMBO-80.* Centro de Estudios de Eficiencia Energética. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2013.

28. LESME JAÉN, R.; MARTÍNEZ J., D.; VIERA ANDRADE, R.; SILVA LORA, E. "Evaluación teórico experimental de un sistema avanzado gasificador de biomasa / motor reciprocante para la generación de electricidad. (Parte I)". *Tecnología Química*. vol. 31, núm. 2, pp. 53-63. 2011.

29. VIEIRA ANDRADE, R.; SILVA LORA, E.; LESME JAÉN, R. "Análise da operação de um gaseificador co-corrente de duplo estágio acoplado a um motor de combustão interna de ignição por centelha". *Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica*. CIBIM, Potugal. 2011.

30. DUPUY, J. *Evaluación Termodinámica del Motor Ashok Leyland LTD alimentado con gas pobre.* Tesis de grado. Centro de Estudios de Eficiencia energética. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2013.

31. LISBETH GALINDO, A.; SILVA LORA, E.; VIERA ANDRADE, R.; YAMILE GIRALDO, S.; LESME JAÉN, R.; MELIAN COBAS, V. "Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality". *Biomass and Bioenergy.* vol. 61, pp. 236-244. 2014.

32. MUÑOZ, M.; MORENO, F.; MOREA ROY, J., RUIZ, J.; ARAUZO, J. "Low Heating Value Gas on Spark Ignition Engines". *Biomass and Bioenergy.* vol. 18, pp. 431-439. 2000.

Recibido: Noviembre de 2015
Aprobado: Marzo de 2016

Dr. René Lesme-Jaén. Universidad de Oriente, Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Cuba. lesme@fim.uo.edu.cu