

Cogeneración a partir de la gasificación de residuos de la industria forestal con el uso de motores de combustión interna

Cogeneration from forest industry wastes gasification with the use of internal combustion engines

René Lesme-Jaén^{1*} <http://orcid.org/0000-0001-7274-0153>

Aldemar Martínez-González² <http://orcid.org/0000-0003-3254-1373>

Electo Eduardo Silva-Lora² <https://orcid.org/0000-0001-8969-3541>

Leandro Rodríguez-Ortiz¹ <https://orcid.org/0000-0002-2303-9835>

¹Centro de Estudios de Energía y Refrigeración. Universidad de Oriente.

²Thermal Power and Distributed Generation Grup. University Itajubá, Brazil

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: lesme@uo.edu.cu

RESUMEN

Cuba cuenta con una planta de gasificación de residuos de la industria forestal en la “Empresa Forestal Integral Gran Piedra Baconao” de Santiago de Cuba que incluye un gasificador, motor de combustión interna y un secador de madera que utiliza la energía residual del motor. El objetivo del presente trabajo consiste en realizar una evaluación teórica experimental de los índices de cogeneración de la instalación. La evaluación se realizó a partir de balances de masa y energía en los equipos que conforman la instalación a partir de una base de datos experimental resultante de 1194 h de trabajo de la instalación, generando energía eléctrica para

el aserrío y la red eléctrica nacional. La evaluación mostró una eficiencia de producción de energía eléctrica del 11,07 %, una eficiencia eléctrica de cogeneración total del 41,94 % y una eficiencia neta de producción de energía eléctrica del 20,30 %. Otros indicadores de cogeneración determinados fueron: índice de calor neto de 4,93 kW/kW y relación energía renovable producida-energía fósil consumida de 4,18.

Palabras clave: biomasa gasificación; electricidad.

ABSTRACT

Cuba has forestry industry residues gasification plant for at the "Gran Piedra Baconao Integral Forestry Company" in Santiago de Cuba, which includes a gasifier, internal combustion engine, and a wood dryer, that uses residual energy from the engine. In this work, an experimental theoretical evaluation of the cogeneration indices of the installation is carried out. The evaluation was carried out from mass and energy balances in the equipment that make up the installation from an experimental database resulting from 1194 hours of work of the, electrical energy generating for the sawmill and the national electrical network. The evaluation showed an electrical energy production efficiency of 11,07 %, a total cogeneration electrical efficiency of 41,94 %, and a net electrical energy production efficiency of 20,30 %. Other cogeneration indicators determined were net heat index of 4,93 kW/KW and renewable energy produced-fossil energy consumed ratio of 4,18.

Keywords: biomass; gasification; electricity.

Recibido: 10/04/2022

Aceptado: 18/07/2022

Introducción

En Cuba la biomasa es la fuente de energía que tiene el mayor potencial entre las fuentes renovables, dentro de ellas, la biomasa forestal resulta de gran interés.

Existen en el país 2 millones 7000 hectáreas de bosques, incluidas 170 253 hectáreas con menos de tres años, lo que corresponde al 26% del área total del país, con un potencial de 5088 mil toneladas de biomasa por año. En la industria maderera se generan grandes volúmenes de residuos, en un aserrío primario se pueden obtener 0,5 m³ de residuos (aserrín, astillas de madera y cotaneras) por m³ de madera en tortas procesadas.⁽¹⁾

Para el aprovechamiento energético de la biomasa, la cogeneración permite obtener altas tasas de ahorro energético y dentro de ellas, la gasificación de biomasa y el uso del gas en motores de combustión interna es una tecnología prometedora, especialmente en plantas de potencia eléctrica inferior a 5 MW. Dos de estos sistemas más ampliamente probados y reconocidos son el gasificador de corriente ascendente en Harboore, Dinamarca y el gasificador de lecho fluidizado Güssing, Austria.⁽²⁾

En el gasificador Harboore, el gas producido a una temperatura de 75 °C, en la primera etapa de acondicionamiento, se enfría a una temperatura de 45 °C suministrando calor al agua para una red de distrito. Este gas se suministra a dos motores de combustión interna de 1400 kW cada uno logrando una eficiencia eléctrica de la instalación del 28%.

En la planta de gasificación de Güssing, el gas producido se alimenta a un motor de combustión interna y el calor residual del motor se utiliza en una red de calefacción local, logrando una eficiencia eléctrica de la instalación del 25%.

En Cuba se ha desarrollado un modelo teórico de un sistema de cogeneración utilizando un gasificador acoplado a un motor de combustión interna ZIL-130, de 103 kW, con el fin de generar electricidad y agua caliente para comunidades aisladas de la red nacional de distribución de electricidad. Este modelo mostró eficiencias térmicas del 32,4%, eficiencia eléctrica del 23,4% y eficiencias globales del 33,3%.⁽³⁾

En este trabajo se realiza una evaluación de los índices de eficiencia energética y sostenibilidad de una planta de gasificación de residuos de la industria forestal con el uso de motores de combustión interna. La evaluación se realizó a partir de

balances de masa y energía en los equipos que conforman la instalación y una base de datos experimentales resultantes de 1194 h de trabajo.

Materiales y métodos

Biomasa

La industria de la madera genera grandes volúmenes de residuos, en Cuba estos residuos no tienen un uso práctico y permanecen en los depósitos constituyendo una fuente de contaminación. En el caso del aserradero primario El Brujo, por cada m^3 de madera en bolos procesados se obtienen $0,5 \text{ m}^3$ de residuos, de los cuales $0,13 \text{ m}^3$ son astillas. La tabla 1 muestra las características de estos residuos.

Tabla 1- Composición en base seca y poder calorífico de las virutas de pino.⁽¹⁾

Biomasa	Análisis Ultimo (%Vol.)					AnálisisAproximado (%Vol.)				PCI _b MJ.kg ⁻¹
	C	H	O	N	S	A	V	CF	W	
Pino	47,95	6,03	45,00	1,02	-	85,47	0,19	14,23	-	16,95

Planta de gasificación y cogeneración

La planta de gasificación instalada en el aserrío El Brujo de Santiago de Cuba inicialmente se concibió sólo para generar electricidad, posteriormente con el objetivo de aprovechar la energía de los gases de escape del motor y la del aire de enfriamiento del agua del radiador se instaló un secador de madera. La figura 1 muestra el esquema general del sistema de cogeneración. La instalación consta de unidad de pre tratamiento y gasificación de biomasa, unidad de depuración de gases y generación de energía, después de esta se ubica el secador de madera.

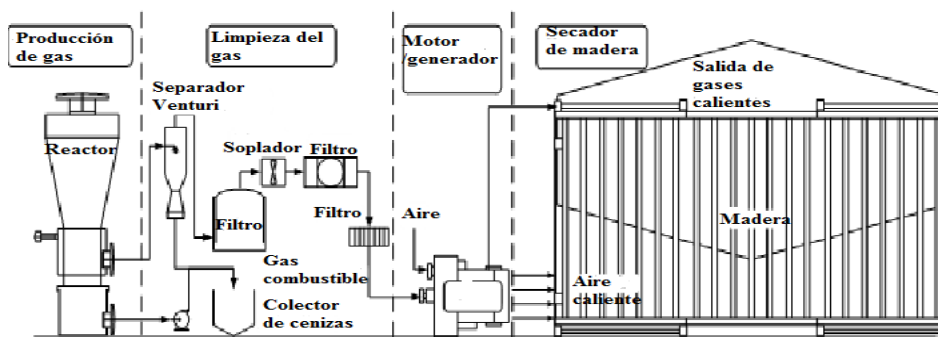


Fig. 1- Esquema general del sistema de cogeneración

El gasificador es un reactor tipo corriente descendente, modelo COMBO-80. El gas de salida del gasificador tiene una temperatura entre 400-500 °C y se somete a un proceso de limpieza en húmedo (ciclón-depurador), disminuyendo su temperatura a 40-50 °C. Este gas acondicionado en un sistema de limpieza en seco formado por un filtro grueso, filtros finos activos y pasivos y filtro de seguridad.

La unidad generadora tiene una capacidad instalada de 40 kW. El secador tiene una capacidad 15 m³ (figura 2)

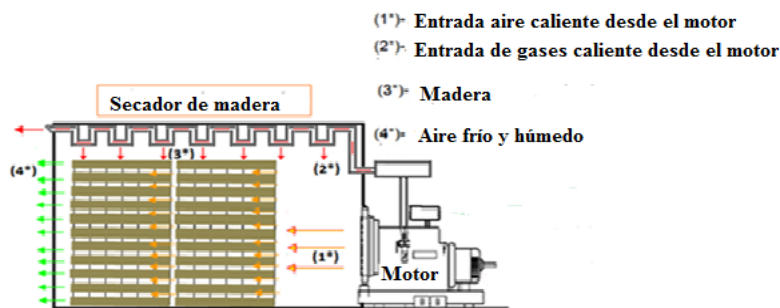


Fig. 2- Secador de madera

Balance de masa y energía en el gasificador

Con el objetivo de evaluar los índices de eficiencia de la instalación, fueron determinadas la eficiencia en frío del gasificador, la eficiencia del motor y el secador. El gasificador fue sometido a una evaluación teórico-experimental a partir

de balances molares en la ecuación general de la gasificación y balances de masa y energía en el gasificador. (figura 3), dadas por las (Ec.1-10).^(4, 5)

Reacción de gasificación. Balance molar

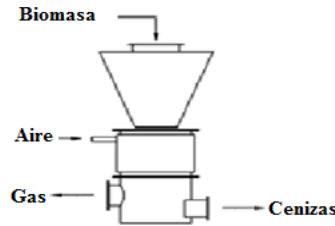
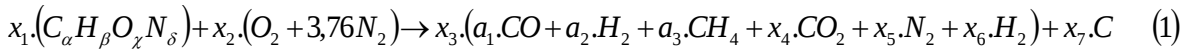


Fig.3- Gasificador

Balance de masa:

$$m_b + m_a = m_g + m_{res} \quad (2)$$

Balance de energía:

$$E_b + E_a = E_g + E_{res} + E_{per} \quad (3)$$

Energía de la biomasa:

$$E_b = m_b . PCI \quad (4)$$

Entalpia del aire:

$$E_a = m_a C_{p_a} (T_{ea} - T_{am}) \quad (5)$$

Energía del gas:

Energía Sensible del gas:

$$E_g = E_s + E_u \quad (6)$$

Energía Útil del gas:

$$E_u = \frac{m_g . PCI_g}{\rho_g} \quad (8)$$

Valor calórico bajo del gas:

$$PCI_g = \sum_{i=1}^{i=n} (a_i . PCI_i) \quad (9)$$

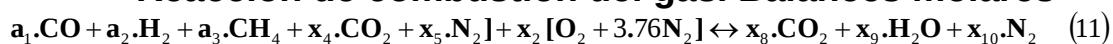
Eficiencia en frío del gasificador:

$$\eta_c = \frac{m_g . PCI_g}{m_b . PCI_b} \quad (10)$$

Modelación del ciclo termodinámico del motor

Para la evaluación de la eficiencia del motor fue realizado el cálculo termodinámico del ciclo para dos condiciones con y sobre alimentación del ventilador situado a la entrada del motor, el cuál succiona los gases del gasificador. El cálculo termodinámico se llevó a cabo a través de la ecuación de la combustión del gas limpio (Ec. 11), teniendo en cuenta la composición del gas medida con analizadores de gases a la salida del gasificador y los resultados de los balances molares en la ecuación de la gasificación. (Ec. 1) ^(6,7)

Reacción de combustión del gas. Balances molares



La metodología desarrollada permitió obtener el rendimiento indicado del motor (Ec. 12), la potencia indicada (Ec. 13), la potencia efectiva (Ec. 14), y el consume específico de gas (Ec. 15). ⁽⁸⁾

Rendimiento indicado del motor:

$$\eta_i = \frac{\alpha \cdot l \cdot P_i}{10 \cdot H_{me} \cdot \rho_{me} \cdot \eta_v} \quad (12)$$

Potencia indicada del motor:

$$N_i = m_{me} \cdot H_{me} \cdot \eta_i \quad (13)$$

Potencia efectiva del motor:

$$N_e = N_i \cdot \eta_m \quad (14)$$

Consumo específico de combustible:

$$g_e = \frac{m_g}{N_e} \cdot 10^3 \quad (15)$$

El balance de energía en el motor fue realizado en correspondencia con la figura 4 y las Ec. (16-19). ^(3, 6, 7, 8)

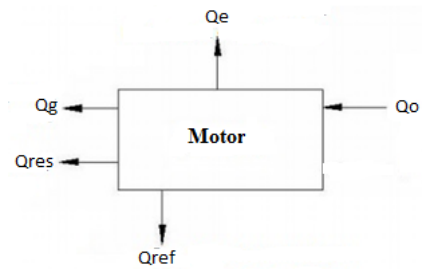


Fig. 4- Entradas y salidas de energía del motor

Balance de energía en el motor:

$$Q_0 = Q_e + Q_{ref} + Q_g + Q_{perd} \quad (16)$$

Calor suministrado por el combustible:

$$Q_0 = H_{me} \cdot m_{ge} \quad (17)$$

Calor equivalente a la potencia efectiva:

$$Q_e = N_e \quad (18)$$

Calor de los gases residuales en el motor:

$$Q_g = m_{ge} \cdot (C_{p_g} T_g - C_{p_{mez}} T_{mez}) \quad (19)$$

Balance de energía en el secador de madera

La eficiencia del secador de madera fue determinada a través de un balance de energía. Inicialmente fueron medidos los flujos de aire y gases a la entrada y salida del secador utilizando un anemómetro digital y sensores del tipo SHT75 para medir sus temperaturas. La humedad inicial y final de la madera fueron determinadas por diferencias de peso antes y después del proceso de secado.⁽⁹⁾ La (tabla 2) muestra los resultados de las mediciones experimentales.

Tabla 2- Mediciones experimentales en el secador de madera

Indicadores	Entrada del secador	Salida del secador
$m_a, \text{kg.s}^{-1}$	3,75	4,02
$m_g, \text{kg.s}^{-1}$	1,30	1,30
$T_a, ^\circ\text{C}$	325,60	321,10
$T_g, ^\circ\text{C}$	683,00	410,00
$M_{\text{mad}}, \text{kg}$	78650,00	18876,00
$X_{\text{mad}}, \%$	52	16

El balance de energía en el secador fue realizado para las condiciones de máxima eficiencia del gasificador. (Ec. 20-27).^(10, 11)

Balance de energía en el secador de madera:

$$Q_a + Q_{gd} = Q_u + Q_h \quad (20)$$

Calor suministrado con los gases y el aire:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (21)$$

Calor útil:

$$Q_u = Q_{H_2O} + Q_{\text{mad}} \quad (22)$$

Calor latente para extraer la humedad de la madera:

$$Q_{H_2O} = \frac{(M_{e \text{ mad}} - M_{o \text{ mad}})}{t} h_{fg} \quad (23)$$

$$M_{e \text{ mad}} = V_{\text{mad}} \cdot \rho_{\text{mad}} \quad (24)$$

$$M_{o \text{ mad}} = V_{\text{mad}} \cdot \rho_{\text{mad}} (1 - X_{\text{mad}}) \quad (25)$$

Calor sensible para calentar la madera:

$$Q_{\text{wood}} = \frac{M_{e \text{ mad}} \cdot \rho_{\text{mad}} \cdot C_{p \text{ mad}}}{t} (T_{e \text{ mad}} - T_{o \text{ mad}}) \quad (26)$$

Eficiencia del secador:

$$\eta_{\text{sec}} = \frac{Q_u}{Q_a + Q_g} \quad (27)$$

Índices de eficiencia de la cogeneración

La eficiencia del sistema de cogeneración fue evaluada a través de los siguientes índices: Eficiencia de la producción de energía eléctrica (Ec. 28-30), consumo de

calor neto (Ec. 31) ^(12,13), consumo específico de combustible (Ec.32) y un indicador de sustentabilidad definido como la relación entre la energía final producida y la energía fósil consumida (Ec. 33).^(14, 15)

Eficiencia de la producción de energía eléctrica:

$$\eta_{ele} = \frac{W_{ele}}{m_b \cdot PCI_b} \quad (28)$$

Eficiencia global de la cogeneración:

$$\eta_{elec} = \frac{W_{elec} + Q_u}{m_b \cdot PCI_b} \quad (29)$$

Eficiencia neta de la producción de energía eléctrica:

$$\eta_{nele} = \frac{W_{elec}}{m_b \cdot PCI_b - \frac{Q_u}{\eta_c}} \quad (30)$$

Índice de calor neto:

$$ICN = \frac{m_b \cdot PCI_b - \frac{Q_u}{\eta_c}}{W_{elec}} \quad (31)$$

Consumo específico de combustible:

$$g_e = \frac{M_b}{W_{ele}} \quad (32)$$

Relación energía renovable producida, energía fósil consumida:

$$R_{ef} = \frac{W_{ele}}{I_{SEN}} \quad (33)$$

Para la evaluación de estos índices se utilizó una base de datos de 1194 horas de trabajo de la instalación (tabla 3)

Tabla 3- Datos de generación eléctrica

W_{elec} (kWh)	H_{SEN} (h)	H_{gen} (h)	H_{gas} (h)	I_{SEN} (kWh)	V_{mad} (m³)	M_b (kg)
140	7	20	23	15	-	280
480	24	55	61	45	-	960
1160	58	119	128	90	-	2320
1900	95	203	215	150	-	3800
2760	138	289	304	225	-	5520
3400	170	356	374	315	-	6800
3960	198	419	440	420	-	7920
5220	261	517	541	540	20	10440
6020	301	591	618	675	43	12040
6620	331	658	688	825	64	13240
7780	389	760	793	990	73	15560
8800	440	850	886	1170	-	17600
10020	501	934	973	1365	104	20040
11020	551	1042	1084	1575	-	2040
12700	635	1143	1188	1800	125	25400
13820	691	1231	1279	2040	138	27640
14260	713	1287	1338	2295	152	28520
15080	754	1364	1418	2565	164	30160
15580	779	1466	1526	2862	190	31160
16060	803	1510	1573	3177	193	32120
16400	822	1570	1636	3507	-	32880
16500	825	1613	1682	3852	214	33000

Los datos reportados en la tabla 3 muestran una generación de electricidad acumulada de 16 500 kW.h en 1682 horas de trabajo del gasificador y 1613 h de trabajo del motor generador, de las cuales 825 h fueron conectadas al SEN, 33 t de residuos del aserrío fueron consumidos a razón de 19,62 kg / h y 214 m³ de madera fueron secados.

Cuando la planta trabajó en cogeneración la generación total de electricidad acumulada fue de 12 540 kW h en 1242 horas de trabajo del gasificador y 1194 horas de trabajo del motor generador (627 horas conectado al SEN), donde 25 toneladas de residuos fueron consumidos y 214 m³ de madera secados.

Los equipos auxiliares de la instalación consumieron electricidad del SEN solamente durante el período de arranque del gasificador, la cantidad de electricidad consumida es recogida en la tabla 3 como insumo de planta (3852

kW.h). Cuando el generador eléctrico fue sincronizado estos equipos consumieron de la generación propia de la instalación.

Resultados y discusión

Balance de energía en el gasificador

Con los valores de la composición del gas (CO , H_2 and CH_4) medidos con un analizador de gases modelo GEM 2000 PLUS y el flujo de gas medido con un tubo Venturi para tres condiciones de trabajo (Potencia eléctrica), y los balances molares realizados a partir de la ecuación de la gasificación (Ec. 1), obtuvimos los flujos de gas, biomasa y residuos mostrados en la (tabla 4).⁽⁵⁾

Tabla 4- Composición del gas, flujo de biomasa, gas y residuos en el gasificador

No.	Potencia eléctrica 5kW _e								
1	Composición del gas, %					m_a	m_b	m_g	m_{res}
2	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹
3	21	13	3	46	16	27,30	29,48	56,32	0,04
No.	Potencia eléctrica 20kW _e								
1	Composición del gas, %					m_a	m_b	m_g	m_{res}
2	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹
3	20	12	2	46	18	32,41	30,28	77,33	0,04
No.	Potencia eléctrica 40kW _e								
1	Composición del gas, %					m_a	m_b	m_g	m_{res}
2	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹	kg.h ⁻¹
3	19	10	2	50	18	80,60	60,00	155,03	0,11

Los balances de masa y energía en el gasificador (Ec. 2-10) fueron realizados con los valores obtenidos de los flujos de masa y energía en la entrada y salida, los resultados de la eficiencia en frío del gasificador se muestra en la (tabla 5).

Tabla 5- Flujos de energía, eficiencia en frío y energía del gas

Potencia eléctrica. (kW _e)	Flujos de energía (kW)					η _c (%)
	E _b	E _a	E _{heat}	E _g		
				E _s	E _u	
5	114,22	6,82	54,74	0,82	65,48	57,33
20	117,47	8,10	55,10	0,94	69,53	59,20
40	240,21	20,00	90,88	2,45	166,88	69,47

Los resultados muestran que el gasificador alcanza su mayor eficiencia a una carga eléctrica del motor de 40 kW (69,47%). Estos resultados están en correspondencia con otros estudios experimentales desarrollados en gasificadores de corrientes descendentes, donde las eficiencias en frío alcanzan valores entre 57-70%.^(16,17)

Cálculo termodinámico y balance de energía en el motor

Como resultados de los balances molares en la ecuación de la combustión del gas (Ec. 11), teniendo en cuenta la composición del gas reportada en la tabla 4, fueron obtenidos el flujo másico de aire y la relación teórica aire combustible para cada una de las condiciones de trabajo del motor.

Tomando estos valores como referencia fue desarrollado el cálculo de los parámetros del ciclo termodinámico del motor para dos condiciones de trabajo con y sin sobrealimentación. A partir de este modelo fueron obtenidos la potencia indicada, efectiva, rendimiento indicado, efectivo y consumo específico de combustible, indicadores que se reportan en la (tabla 6).

Tabla 6- Parámetros del motor ⁽⁹⁾

Parámetros	Gas Pobre					
	Sin sobre alimentación			Con alimentación		
	5kW	20 kW	40kW	5kW	20 kW	40kW
N_i (kW)	22,52	28,7	56,34	23,6	30,14	59,72
N_e (kW)	16,1	20,41	40,00	17,00	21,70	43,00
η_i	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32
η_e	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22
g_e (kg/kWh)	3501,50	3784,30	3875,60	3318,03	3563,4	3605,5

Con estos resultados fue realizado el balance de energía en el motor a través de las Ec. (16-19) para las condiciones nominales, los resultados son mostrados en el diagrama Sankey de la (figura 8).

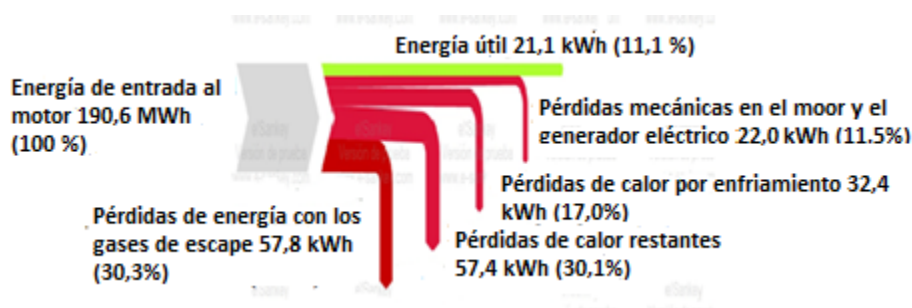


Fig. 8- Eficiencia del uso del combustible en el motor sin cogeneración

Como resultado se obtuvo que el 30% de la energía del combustible se pierde con los gases de escape, demostrando el potencial de cogeneración de estas instalaciones. Similares resultados de % de pérdidas con los gases de escape y refrigeración fueron obtenidos en modelos de motores de combustión interna para cogeneración desarrollado ^(3,8) usando gas natural y gas de biomasa respectivamente. Valores de eficiencia en motores diesel modificados a gas pobre en el rango entre 21-24% fueron reportados en los trabajos.^(15,18)

Balance de energía en el secador de madera

A partir de las mediciones experimentales del flujo y temperatura del aire, flujo y temperatura del gas y contenido de humedad de la madera reportados en la (tabla

2), así como, el volumen total de madera seca reportado en la (tabla 3)(214 m³) y en correspondencia con las (Ec. 20-27), fue desarrollado el balance de energía en el secador y obtenidos las diferentes formas de energía a la entrada y salida, calor útil eficiencia (tabla 7)

Tabla 7- Resultados del balance de energía en el secador

Q_a (kW)	Q_{gd} (kW)	Q_u (kW)	η_{sec.} (%)
20,58	236,22	28,84	11,23

Índices de cogeneración

La eficiencia de cogeneración del sistema fue evaluada a través de los siguientes índices: Eficiencia en la producción de energía eléctrica (Ec. 28-30), índice de consume de calor neto (Net Heat Rate) (Ec. 31), ^(12,13) consumo específico de combustible (Ec. 32), y un indicador de sustentabilidad evaluado a través de la relación entre la energía final y la energía fósil requerida para producirla (Ec. 33). Los resultados se muestran en la (tabla 8).

Tabla 8- Índices de eficiencia de la cogeneración

Indicadores	Unidades	Valores
W _{ele}	kWh	16500
W _{SEN}	kWh	12540
I _{SEN}	Kwh	3852
H _{gas}	h	1 682
H _{gen}	h	1613
M _{res}	ton	33,00
η _{ele}	%	11,07
η _{elec}	%	41,94
η _{nele}	%	20,30
INC	kW/kW	4,93
g _e	Kg/ kWh	2,00
R _{ef}	-	4,28

La (figura 9) representa el proceso de transformación de la energía del gas en energía útil en el motor con cogeneración.

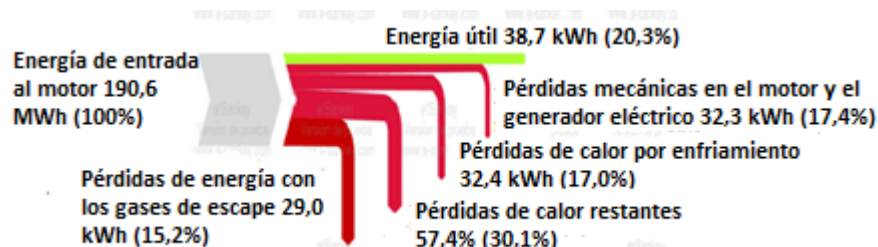


Fig. 9- Eficiencia del uso del combustible en el motor con cogeneración

Similares valores de eficiencia en la producción de electricidad (11,69%) fueron reportados en una planta de gasificación de cascarones de coco con un motor Diésel de 11 kW de potencia efectiva ⁽¹⁹⁾ y un motor Diésel modificado de 10kWe acoplado a un gasificador descendente que trabaja con madera. ⁽²⁰⁾

El valor de la eficiencia eléctrica obtenido (11,07%) es menor que el reportado por Harboore (28%), Güssing (25%). ⁽²⁾ Las diferencias pudieran ser debido a la mayor eficiencia eléctrica de los motores y a una mayor eficiencia en los sistema de utilización de la energía residual del motor, ya que los coeficientes de transferencia de calor de los gases y el aire en el proceso de secado son inferiores al agua usado como fluido en la red de calefacción local.

De la misma forma los valores de eficiencia en la producción de energía eléctrica y la eficiencia global de la cogeneración son inferiores ya que los motores que trabajan con combustible fósil pueden alcanzar mayores eficiencias 45 % y 57 % ⁽⁸⁾ pues pueden trabajar a mayores relaciones de compresión.

Conclusiones

1. La planta de gasificación de residuos en el aserrío El Brujo produce electricidad y calor con una eficiencia de producción de energía eléctrica de 11,07%, una eficiencia global de cogeneración de 41,94 %, una eficiencia neta de producción de energía eléctrica del 20,30 %, un

consumo específico de combustible de 2,00 kg/kWh y una relación de energía renovable producida-energía fósil consumida de 4,18, siendo posible considerar que la energía eléctrica producida es renovable.

2. Los balances de energía realizados para diferentes composiciones del gas y cargasen los diferentes equipos que componen la instalación mostraron: Una eficiencia en frío en el gasificador entre 57,37-69,47 %, eficiencia efectiva del motor 21,00-22, 00 %, los valores mayores corresponden a la potencia nominal del motor en modo de sobrealimentación.
3. La eficiencia del secador de madera para las condiciones de máxima eficiencia del gasificador y el motor alcanza 11,23 %; por lo que el uso de la energía de salida del motor en el secado de la madera incrementa la eficiencia de la instalación en un 9%.

Nomenclatura

PCI. Valor calórico inferior. MJ/kg

a_1 , a_2 , a_3 . Concentraciones de CO, H₂ y CH₄ en el gas, (%vol).

x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_7 , x_8 , x_9 , x_{10} . Coeficientes estequiométricos, kmol/s.

m_b . Consumo de biomasa, kg/s

m_a . Flujo de aire, kg/s

m_g . Flujo de gas, kg/s

m_{res} . Total de residuos sólidos generados, kg/s

m_{ge} . Flujo total de gases residuales del motor, kg/s

E_b . Energía de la biomasa, kW

E_a . Entalpía del aire, kW

E_g . Energía total del gas, kW

E_{res} . Pérdidas de energía química y sensible de los residuos, kW

E_{per} . Pérdidas de energía del gasificador con los alrededores, kW

E_s . Calor sensible del gas producido, kW

E_u . Energía útil del gas producido, kW

C_{p_a} . Calor específico del aire, kJ/kg.K

$C_{p_{mad}}$. Calor específico de la madera, kJ/kg.K

C_{p_g} . Calor específico de los gases residuales del motor, kJ/kg.K

$C_{p_{mez}}$. Calor específico de la mezcla de gases residuales del motor, kJ/kg.K

h . Entalpía, kJ/kg

M_{mg} . Masa molecular del gas producido, kg/kmol
 N_i, N_e . Potencia indicada y efectiva del motor, kW
 g_e . Consumo específico de combustible, kg/kW.h
 T_{ea} . Temperatura del aire a la entrada del gasificador, K, °C
 T_{amb} . Temperatura ambiente, K, °C
 T_{emad} . Temperatura de la madera a la entrada del secador, K, °C
 T_{omad} . Temperatura de la madera a la salida del secador, K, °C
 M_b . Consumo másico de biomasa del gasificador, kg
 V_{mad} . Volumen de madera, m³
 M_{emad} . Masa inicial de la madera, kg
 M_{omad} . Masa final de la madera, kg
 M_{res} . Masa de residuos de madera consumido, kg
 B_{res} . Consumo de residuos, kg h⁻¹
 X_{mad} . Contenido de humedad de la madera en base húmeda, %
 Q_0 . Energía que entra al motor con el combustible, kW
 Q_e . Energía equivalente a la potencia efectiva del motor, kW
 Q_g . Calor residual de los gases del motor, kW
 Q_{enf} . Pérdidas de calor por enfriamiento del motor, kW
 Q_{per} . Pérdidas de calor al medio en el motor, kW
 Q_{H_2O} . Calor usado para extraer la humedad de la madera, kW
 Q_{mad} . Calor usado para calentar la madera, kW
 H_{me} . Densidad energética de la mezcla aire -combustible, MJ.kg⁻¹
 Q_a . Calor que entra al secador de madera con el aire, kW
 Q_{gd} . Calor que entra al secador con los gases residuales del motor, kW
 Q_u . Calor útil en el secador, kW
 t . Tiempo de secado, s
 h_{fg} . Calor latente de vaporización a presión atmosférica y temperatura media del secador, kJ.kg⁻¹
 W_{elec} . Generación de electricidad, kWh
 H_{SEN} . Horas de trabajo sincronizadas al SEN, h
 H_{gen} . Horas de trabajo del generador eléctrico, h
 H_{gas} . Horas de trabajo del gasificador, h
 I_{SEN} . Electricidad consumida del SEN, kWh
 ICN . Índice de calor neto, kW/kW
 R_{ef} . Relación de energía renovable producida/energía fósil consumida.

Símbolos Griegos:

ρ_{mad} . Densidad aparente de la madera, kg/m³
 η_c . Eficiencia en frío del gasificador, (%)
 η_i . Rendimiento interno del motor, (%)
 η_e . Rendimiento efectivo del motor, (%)
 ΔT . Diferencia de temperatura entre la entrada y salida de cada fluido, K, °C
 η_{sec} . Eficiencia del secador de madera.
 η_{ele} . Eficiencia eléctrica.
 η_{elec} . Eficiencia global de cogeneración.
 η_{nele} . Eficiencia neta eléctrica.

Referencias bibliográficas

1. LESME JAÉN Rene, OLIVA RUIZ Oscar. Coeficientes de residuos de la industria florestal. *Revista Tecnología Química*, 2006. **26**(3), pp:26-29 ISSN 2224 6185.
2. JESPER Ahrenfeldt, TOBIAS P. Thomsen, ULRİK Henriksen, LASSE R. Clausen. Biomass gasification cogeneration. A review of state of the art technology and near future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 2013, **50**, pp: 1407-1417. ISSN: 1359-4311
3. PROENZA PÉREZ Nestor, BLANCO MACHIN Einara, TRAVIESO PEDROSO Daniel, ROBERTS Justo Jose, SANTANA ANTUNES Julio, LUZ SILVEIRA José. Biomass gasification for combined heat and power generation in the Cuban context: Energetic and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2015, (90), pp: 1-12. ISSN: 1359-4311
4. LESME JAÉN René, GARCÍA FAURE Luis, OLIVA RUIZ Luis, PAJARÍN RODRÍGUEZ Juan, REVILLA SUAREZ Dennis. Biomass Gasification for Power Generation Internal Combustion Engines. Process Efficiency. *Revista Tecnología Química*. (2016) **35**(2). ISSN 2224 6185
5. MARTÍNEZ Juan Daniel, SILVA LORA E. E, VIERA ANDRADE Rubenildo, LESME JAÉN René. Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor. *Biomass and Bioenergy*, 2011, (35), pp: 3465-3480. ISSN: 0961-9534
6. CENGEL Ayunus, MICHAEL A. Borles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill. 8va Edición. New York, 2015. ISBN 978-970-10-7286-8
7. HEYWOOD B John. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2da Edición. Nueva York. Editorial: McGraw-Hill Education. ISBN: 9781260116106

8. SRIDHAR G., SRIDHAR, H. V., DASAPPA, S., PAUL, P. J., RAJAN, N. K. S., MUKUNDA UK, H. S. "Development of Producer Gas Engines". Proc. IMechE, Part D: *Journal of Automobile Engineering*, 2005, **219**, pp: 423-438. ISSN: 2455-3360
9. GRAVE DE PERALTA CAMPOS, Leonel. *Evaluación de los indicadores de desempeño y la eficiencia energética de un sistema de cogeneración perteneciente a la Empresa Forestal Gran Piedra-Baconao*. Tesis en opción al título de máster en Eficiencia Energética. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2017.
10. ROJAS VARGAS, Armando. Balance de energía en un horno de secar madera. *Revista Tecnología Química*. (2016), **36**(1), pp: 20-35. ISBN 0041-8420
11. TIPPAYAWONG N, TANTAKITTI C, THAVORNUN S, PEERAWANITKUL V. Energy conservation in drying of peeled longan by forced convection and hot air recirculation. *Biosystems engineering*, 2009, (104), pp: 199 – 204. ISSN: 1537-5110
12. BORROTO, Anibal; GONZÁLEZ, Felix, DE ARMAS, Marcos. *Temas avanzados de cogeneración*. Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2007. ISBN 978-959-257-181-5.
13. BOSCHIERO DO ESPIRITO SANTO Denilson, GALLO Waldyr Luiz Ribeiro. Utilizing primary energy savings and exergy destruction to compare centralized thermal plants and cogeneration/trigeneration systems. *Energy* 2017, (120) pp: 785-795. ISSN: 0360-5442
14. JE-LUENG Shie, CHING-YUAN Chang, CI-SYUAN Chen, DAI-GEE Shaw, YI-HUNG Chen, WEN-HUI Kuan, HSIAO-KAN Maf. Energy life cycle assessment of rice straw bio-energy derived from potential gasification technologies. *Bioresource Technology*, 2011, (102) pp: 6735–6741. ISSN: 0960-8524
15. VERMA Aman, KUMAR Amit. Life cycle assessment of hydrogen production from underground coal gasification. *Applied Energy*, 2015, (147), pp: 556–568.
16. SANG JUN Yoon, YUNG-IL Son, YONG-KU Kima, JAE-GOO Lee. Gasification and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a

downdraft fixed-bed gasifier. *Renewable Energy*, 2012, (42) pp:163-167.ISSN: 0960-1481

17. RAMAN P, N.K. RAM N, GUPTA R. A dual fired downdraft gasifier system to produce cleaner gas for power generation: Design, development and performance analysis. *Energy*, 2013, (54), pp: 302-314.ISSN: 0360-5442

18. SHASHIKANTHA, B, KHAIRNAR P, Kamat, PARIKH P. Development and Performance Analysis of a 15 kWe Producer Gas Operated SI Engine.Recent Advances in Biomass Gasification and Combustion. *Proceedings of Fourth National Meet on Biomass Gasification and Combustion, India, Journal of Automobile Engineering*, 2005, **219** (3) pp: 423-438.ISSN: 2455-3360

19. BHATTACHATYA, S. C., HLA, S. S., PHAM, H. L.A Study on a Multi- Stage Hybrid Gasifier-Engine System.*Biomass and Bioenergy*, 2001, (21), pp:445-460.ISSN: 0961-9534

20. VIERA ANDRADE R, LESME JAÉN R, SILVA LORA E. Análise da operação de um gaseificador de leito fixo com duplo estágio acoplado um motor de combustão interna de ignição por centelha para conversão de biomassa em energia elétrica.VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.VI National Congress of Mechanical Engineering 18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brasil. *CONEM 2010* ISSN2178-180X

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

René Lesme Jaén: Participó en el diseño de las tareas de investigación realizadas, procesamiento de datos experimentales, así como, en la elaboración, revisión y aprobación final del artículo.

Aldemar Martínez González: Participó en el diseño de las tareas de investigación realizadas, procesamiento de datos experimentales, así como, en la elaboración, revisión y aprobación final del artículo.

Electo Silva Lora Recolección de datos experimentales, ejecución de trabajos experimentales, revisión y aprobación final del artículo.

Leandro Rodríguez Ortiz: Participó en la ejecución de trabajos experimentales, revisión y aprobación final del artículo