



Sistema de gasificación para el tratamiento de los residuos forestales en comunidades rurales turísticas

Gasification system for the treatment of forest waste in rural tourist communities

Eduardo Miguel Matheu-Muñiz^{1,*}, Ileana Pereda-Reyes¹, Deny Oliva-Merencio¹, Cesar Arnaldo Cisneros-Ramírez¹, Arnold Janssen¹

I. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER. La Habana, Cuba.

II. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, CIPRO. La Habana, Cuba.

III. Ghent University, Department of Architecture & Urban Planning. Gent, Belgium.

* Autor de correspondencia: ematheum@mecanica.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 4 de febrero de 2023

Aceptado: 6 de abril de 2023

Resumen

En la última década se ha evidenciado un notable incremento en la producción mundial de gas de síntesis procedente de la gasificación de la biomasa; este proceso constituye una vía de aprovechamiento energético a partir de la conversión termoquímica de residuos forestales. El objetivo fue realizar el análisis energético de un sistema de gasificación de la biomasa forestal residual en el complejo eco-turístico Las Terrazas con la finalidad de obtener energía útil. Se desarrolló un modelo en el software SuperPro Designer para la gasificación de este tipo de recurso biomásico, que permite predecir la evolución de la composición del gas pobre en función de la temperatura y la composición elemental de la biomasa forestal. Para el gas producto de la gasificación se

obtiene un valor de poder calorífico de 5,87 MJ/m³. En el bloque de potencia, constituido por una turbina a gas con generador eléctrico acoplado, se logra generar electricidad con una capacidad de 620,42 kW, unos 2 948,24 MWh de energía eléctrica al año. Con el calor residual de los gases de escape de la turbina, se propone generar 0,5 kg/s de vapor para la cocción de alimentos y para el sistema de agua sanitaria de varias instalaciones de servicio del complejo eco-turístico.

Palabras claves: biomasa forestal, gas de gasificación, ciclo de potencia, ciclo combinado de calor y potencia.

Abstract

In the last decade, there has been a notable increase in the world production of synthesis gas from biomass gasification; this process constitutes a way for energy utilization from the thermochemical conversion of forest residues. The objective was to carry out an energy analysis using a residual forest biomass gasification system at the Las Terrazas eco-tourist complex in order to obtain useful energy. A model was developed in the SuperPro Designer software for the gasification of this type of biomass resource, which allows for predicting the evolution of the composition of the lean gas as a function of temperature and the elemental composition of

the forest biomass. For the gas produced by gasification, a calorific value of 5.87 MJ/m³ is obtained. In the power block, consisting of a gas turbine with a coupled electric generator, electricity generation is achieved with a capacity to generate. With the waste heat from the turbine's exhaust gases, it is proposed to generate 0.5 kg/s as steam for cooking food and for the sanitary water system of various service facilities of the eco-tourist complex.

Key words: forest biomass, syngas, power cycle, combined heat and power cycle.

Cómo citar este artículo:

Matheu Muñiz EM, Pereda Reyes I, Oliva Merencio D, Cisneros Ramírez CA, Janssen A. Sistema de gasificación para el tratamiento de los residuos forestales en comunidades rurales turísticas. Ingeniería Mecánica. 2023;26(2):e660. ISSN 1815-5944.

1. Introducción

El mundo realmente no ha disminuido los altos niveles de consumo de combustible que ha estado vinculado a una forma de desarrollo asociado al crecimiento económico, sin detenerse en los efectos negativos sobre los recursos naturales y a la propia naturaleza [1]. A pesar de que en los últimos años han aumentado los acuerdos internacionales para tomar acciones que incrementen la participación de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) en la generación energética mundial aun el consumo de los combustibles fósiles es ampliamente

predominante, más del 90 % a nivel universal. Por ello, la dependencia en la costosa energía fósil se está convirtiendo en un factor limitante para muchas economías emergentes y desarrolladas [2].

La disponibilidad energética segura y accesible, y que no perjudique al medio ambiente es esencial para el desarrollo sostenible de los pueblos, fundamentalmente los subdesarrollados, y la mejora de su calidad de vida. En los últimos años, las FRE han ido adquiriendo globalmente una importancia cada vez mayor, básicamente por razones energéticas y ambientales. El déficit de energía que sufre el mundo actual y en particular los países subdesarrollados, tiene una situación cada vez menos favorable. Si bien el asunto se agudiza en las zonas urbanas y las grandes ciudades, no es un problema considerablemente menor en las regiones rurales o comunidades remotas.

En las zonas rurales, fundamentalmente en los países subdesarrollados, suelen darse una serie de problemas económicos y sociales, como el desempleo, la carencia de oportunidades para los jóvenes, lo que lleva a la migración de personas hacia las urbanas. En el desarrollo de un país, la energía eléctrica desempeña un papel importante y se considera uno de los factores clave para la prosperidad y el crecimiento industrial. Por esto, el tema energético tiene tanto peso en el tipo de crecimiento o de desarrollo que se asume. Si los niveles de sostenibilidad en la generación energética son altos porque la base está en recursos renovables, entonces la contribución ambiental y social serán notables [3], si la generación de energía sigue basándose en los combustibles fósiles, se mantendrán las graves afectaciones al medioambiente y a la sociedad.

Es indispensable que se utilicen las fuentes de energías propias y renovables que están al alcance como la energía eólica, la energía solar, la energía de la biomasa, entre otras. En este contexto, el empleo de tecnologías que permitan aprovechar los recursos biomásicos debe ser prioritario pues son capaces de asumir como materia prima todo tipo de residuos orgánicos con fines energéticos: agrícolas, domésticos, agroindustriales, forestales, entre otros. En definitiva, de lo que se trata es de utilizar todos los residuos orgánicos que actualmente no tienen un tratamiento adecuado, representando así un constante peligro de contaminación ambiental [4].

El desarrollo de tecnologías que permitan un mejor aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, de bajos costos, y la obtención de subproductos que incrementen su valor agregado (energía, productos químicos, etc.), constituyen un reto para la comunidad científica internacional, y en particular en países subdesarrollados, como Cuba. La disponibilidad energética cercana, a partir de recursos propios, renovables, confiable, eficiente, y que no perjudique al medio ambiente, es esencial para mejorar su calidad de vida [1].

La biomasa como fuente de energía, tiene gran potencial en Cuba debido a los recursos biomásicos que se generan en varios sectores económicos (agrícolas, agroindustriales, de la industria alimenticia, residuos sólidos urbanos), que son mal depuestos y/o no son explotados. El inmenso potencial existente en el país aún no se aprovecha y deben darse pasos para hacerlo por lo que significa en contribución energética y mejoría medioambiental. Existen grandes oportunidades en el país, en la aplicación extensiva de las tecnologías que emplean los recursos provenientes de la biomasa, con decenas de MWh por generar, miles de toneladas de contaminantes por evitar y miles de toneladas de CO₂ por dejar de emitir.

Un caso emblemático en Cuba, que constituye una referencia de lo que se puede hacer en términos de desarrollo local con amplio respeto por el medio ambiente es el asentamiento poblacional de Las Terrazas, con una comunidad importante y un complejo ecoturístico que ha jugado un sustancial papel en las últimas décadas en esa zona de la Sierra del Rosario, perteneciente a la provincia de Artemisa. A pesar de todo lo realizado, aún quedan reservas para incrementar los niveles de sostenibilidad de Las Terrazas, lo que se convierte en una oportunidad para aumentar ostensiblemente el aprovechamiento del potencial de recursos biomásicos que caracterizan esa región, como son los residuos forestales generados en las labores silviculturales al bosque. Se conoce que la gasificación de biomasa es un proceso termoquímico apropiado para tratar este tipo de recursos. Este trabajo pretende investigar la aplicación de la gasificación para el aprovechamiento de los residuos forestales generados en el entorno de Las Terrazas, a través de su simulación empleando el software SuperPro Designer.

2. Métodos y Materiales

El objeto de estudio del trabajo fue la energización de una comunidad en el ámbito rural a partir de los recursos propios que pueden ser generados en su entorno. El foco de la investigación se ubicó en comunidad y complejo ecoturístico Las Terrazas, ubicada en las cercanías del río San Juan, dentro de la Sierra del Rosario, en la Provincia de Artemisa, a 77 km de La Habana. Esta comunidad tiene peculiaridades al estar enclavada en un ecosistema incluido dentro de una región de Reserva de la Biosfera en el país, como lo es la Sierra del Rosario. Esta comunidad, asociada al complejo ecoturístico, surgió como referencia del desarrollo sostenible en una locación rural. Tiene una población de alrededor de 3 000 habitantes, donde todas las actividades de gestión en la vida de esta comunidad demandan un alto consumo de energía eléctrica, según resultados previos obtenidos por este equipo de trabajo. Este trabajo se centró en el aprovechamiento de los recursos biomásicos que abundan en la zona donde está enclavada Las Terrazas. Se hizo énfasis en el potencial de residuos forestales que podrían ser recolectados a partir de la intensificación de las labores silviculturales en beneficio del bosque, como fuente principal de recursos naturales y en cumplimiento de unas de sus funciones ambientales.

Actualmente, la fuente principal de abastecimiento de energía del sitio es la energía eléctrica proveniente del Sistema Electroenergético Nacional (SEN). La población realiza todas sus actividades domésticas y sociales con

energía eléctrica, la cocción de los alimentos se realiza usando gas licuado. La comunidad-complejo tiene una demanda eléctrica de 156 588 kWh/mes, aproximadamente. Entre los servicios que representan un 64,36 % con un consumo de 100 788 kWh/mes y las viviendas con 55 800 kWh/mes lo que representa un 35,63 % del consumo aproximado de toda la comunidad-complejo.

2.1. Sistema de generación de energía eléctrica mediante la gasificación de residuos forestales

Se propuso el análisis de un sistema de generación de energía eléctrica a través de la gasificación de los residuos forestales colectados en el entorno de Las Terrazas con una turbina a gas acoplada, figura 1. Este tipo de sistema integrado, es una tecnología ya madura, que ha sido evaluada en varios casos [5] para evitar la dependencia de los combustibles fósiles en comunidades rurales. Es importante que este tipo de variante para la generación de energía, debe ser competitiva en cuanto a su rendimiento por unidad de biomasa, en cuanto a costos de operación y al ahorro que representa para el país. Para el análisis del sistema se recurrió al programa de diseño de procesos SuperPro Designer, en el cual se estudia un ciclo de gas que toma la energía de la mezcla del gas producido en el proceso de gasificación, gas pobre.

De igual manera, se hicieron consideraciones que permiten describir el proceso de manera satisfactoria: la existencia de condiciones estacionarias de operación, la aplicación de las mismas propiedades y suposiciones que para el aire estándar conociendo el exceso de aire. Los cambios de energía cinética y potencial son despreciables. Se consideró la variación de los calores específicos con la temperatura. Se asumió que el tiempo de trabajo del sistema son 330 días/año. El potencial de biomasa residual que se espera correspondiente a 4 524,87 t/año, se distribuye a lo largo de los meses de trabajo de forma que se obtiene una disponibilidad de 13,71 t/día (0,24 kg/s). Se realizó un análisis energético del gasificador empleando las metodologías ya empleadas por otros investigadores que han tenido buenos resultados [6, 7] con las modificaciones necesarias para el ajuste de este trabajo.

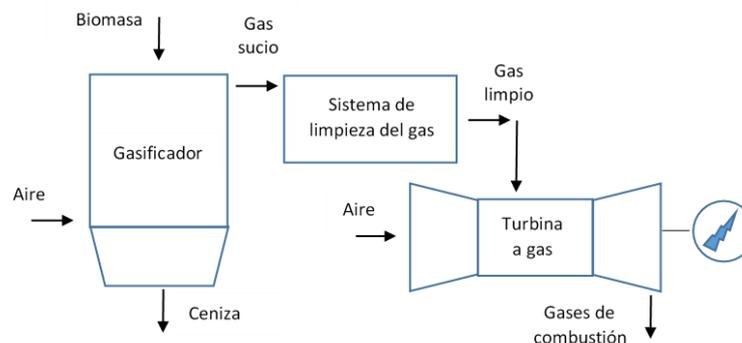


Fig. 1. Esquema del sistema de generación de energía eléctrica mediante la gasificación de residuos forestales con turbina a gas acoplada. Fuente: autores

Se consideró que el poder calórico de los residuos forestales es de 18 700 kJ/kg [8, 9], considerando que los que se colectan en la zona tienen predominancia del Pino y la Majagua. La composición en base seca de los residuos forestales se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición elemental (%) de la biomasa en base seca. Fuente: [10-12]

Biomasa	C	H	O	N	S
Leña a partir de residuo forestal	49,15	5,93	44,17	0,18	0,55

2.2. Balance de masa y energía en el gasificador

Es importante establecer las pautas que determinan el balance de masa y de energía en el gasificador, para desarrollar todo el análisis energético necesario para caracterizar el desempeño de la instalación para el aprovechamiento biomásico que se evalúa, figura 2.

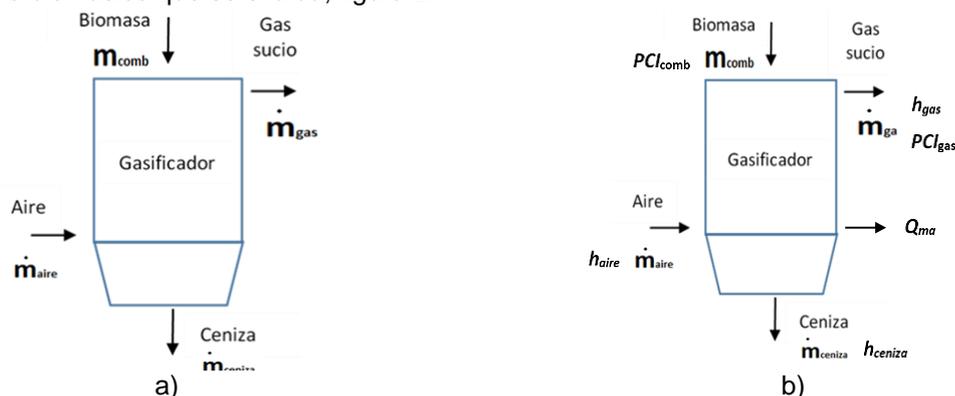


Fig. 2. Esquema del balance de masa a) y de energía b) en el gasificador. Fuente: autores

Se realizó un balance de masa, ecuación (1), en el gasificador, con lo cual se obtuvo los flujos necesarios que caracterizan al sistema, figura 2a).

$$\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{cen} \text{ [kg /s]} \quad (1)$$

Los datos de la calidad del gas generado que se obtuvo en la simulación del sistema, se mostrarán más adelante en los resultados del trabajo. Se tomaron los principales elementos constituyentes del gas y sus respectivas concentraciones máscas en la mezcla (%), para el cálculo del poder calórico del gas producto de la gasificación, a partir de la ecuación (2) [8]:

$$PCI_{gas} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i * PCI_i \quad (2)$$

Donde:

PCI: poder calórico inferior de los componentes combustibles del gas y

C_i: fracción volumétrica del componente en el gas (%).

PCI_{CO} = 12,6 MJ/Nm³, PCI_{H₂} = 10,7 MJ/Nm³, PCI_{CH₄} = 35,8 MJ/Nm³.

El balance energético se realizó a partir de la energía que entra y sale del gasificador con el objetivo de evaluar las pérdidas y su influencia en el proceso termoquímico estudiado. La ecuación (3) refleja el balance planteado, siguiendo los flujos energéticos identificados en el sistema, figura 2b):

$$m_{comb} \bullet PCI_{comb} + m_{aire} \bullet h_{aire} = m_{gas} \bullet PCI_{gas} + m_{gas} \bullet h_{gas} + Q_{cen} + Q_{ma} \quad (3)$$

Donde:

Q_{cen}: potencia térmica que se pierde con las cenizas (kW), que se halla a partir de la siguiente ecuación (4):

$$Q_{cen} = \dot{m}_{cen} \bullet c_{cen} (T_{cen} - T_a) \quad (4)$$

Donde:

T_{cen} = 800 °C siendo esta la temperatura de trabajo del gasificador.

C_{cen} = 0,68 kJ/kg K, calor específico de las cenizas [9].

Al salir del gasificador, el gas fue conducido a través de un intercambiador de calor, donde disminuye su temperatura con el objetivo de reducir su volumen específico, para su entrada a la cámara de combustión. A partir del flujo de biomasa de 13,71 t diarias con un PCI de 18,70 MJ/kg y una humedad de 18 % [10-12], se calculó el volumen de aire teórico necesario para que ocurra la combustión, considerando que la gasificación es una combustión que ocurre con déficit de aire con relación al estequiométrico, con el 45 % del aire teórico como promedio. Mediante la ecuación (5) se realiza este cálculo [10-12].

$$V_a^o = 0,0889(C^t + 0,375 \bullet S^t) + 0,265 \bullet H^t - 0,0333 \bullet O^t, [Nm^3 / kg_{comb}] \quad (5)$$

2.3. Simulación del sistema de generación energética

En la figura 3, se muestra el esquema del sistema simulado en el programa de diseño de procesos SuperPro Designer.

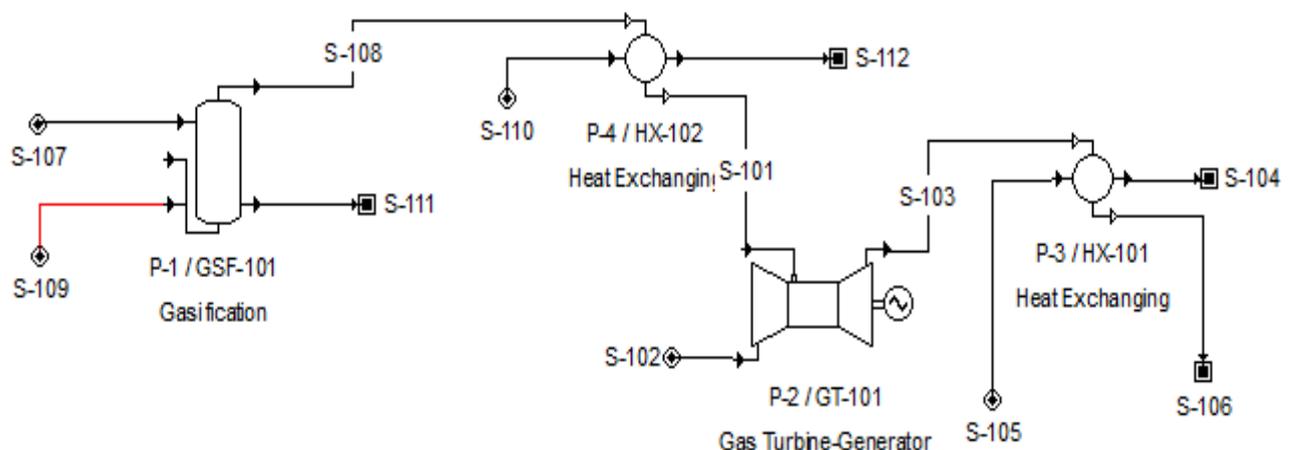


Fig. 3. Esquema del sistema simulado en el programa de diseño de procesos *SuperPro Designer*. Fuente: autores

La entrada de la biomasa forestal se identificó como S-107, en la que se ajustó el valor a 0,24 kg/s para un período de trabajo de 330 días al año, con una temperatura de 50 °C debido al anterior proceso de secado al que fue sometida. Las propiedades de la biomasa se introdujeron en el programa teniendo en cuenta la composición de los distintos elementos constituyentes mostrados en la tabla 1 y su poder calórico. Se utilizó el aire como agente oxidante y su entrada se identificó como S-109. La salida del gas del gasificador se denominó como S-108 y luego pasó al enfriador (P4/HX-102) donde se le disminuyó su temperatura a 30 °C.

Bloque de potencia

El bloque de potencia estaba compuesto por el compresor, la cámara de combustión, la turbina y el generador eléctrico, como se muestra en la figura 4.

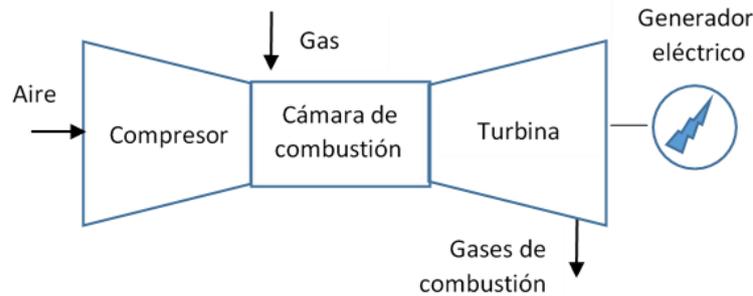


Fig. 4. Esquema del bloque de potencia eléctrica. Fuente: autores

Las características de la entrada de aire al compresor (flujo, presión y temperatura) se ajustaron en el módulo de entrada que se identifica por S-102. Se asume que el aire fue extraído del medio ambiente por lo que se la presión toma un valor de 101,3 kPa. La temperatura del aire ambiente se considera de 27 °C y el flujo quedó determinado por el exceso de oxígeno con el cual se trabaja en la combustión, llegando a alcanzar un valor de 1,053 kg/s. Se consideraron eficiencias isoentrópicas para la turbina y el compresor del 95 y 90 % respectivamente. Además, se toma una relación de compresión de 10 y un exceso de aire del 130 %.

2.4. Energía eléctrica producida por la instalación

Para calcular la energía producida anualmente, se utiliza la ecuación (6).

$$E_p (kWh) = CP \cdot \tau \cdot f_p \quad (6)$$

Donde:

E_p : energía producida en kWh.

CP : capacidad de la planta en kW.

τ : tiempo de trabajo 6480 horas.

f_p : factor de planta 0,6.

$$E_p = 620,42 \text{ kW} \left[330 \text{ d} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \right] 0,6$$

$$E_p = 2948,24 \text{ MWh x año}$$

En el módulo S-103, se muestran los datos de la salida de los gases de escape de la turbina, teniendo en cuenta el flujo de gases de 1,276 kg/s y la temperatura de salida de estos gases de 704 °C.

2.5. Producción de vapor en el sistema

En la simulación se agregó un intercambiador de calor, de tubos y coraza, a contracorriente, que se identifica como P3/HX-101, con el objetivo de aprovechar los gases de escape de la turbina. El equipo posee un coeficiente global de transferencia U de 900 W/m²K y un área de transferencia de 5,373 m². En la figura 5, se muestra el esquema del balance de masa de dicho intercambiador. A partir del vapor generado se conformó un sistema de procesos que pudiera ser implementado en la comunidad, el cual representa los posibles consumidores, de agua caliente sanitaria, vapor para la cocción y una cámara para el secado de la materia prima empleada en el gasificador.

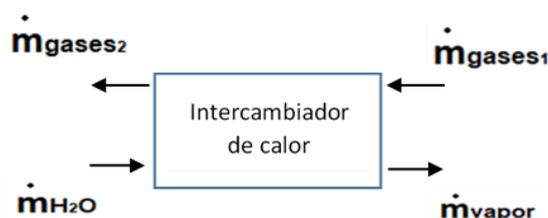


Fig. 5. Esquema del balance de masa en el intercambiador de acople. Fuente: autores

Al salir del intercambiador de calor, el vapor va al colector con una calidad del 100 %, a una presión de 10 bar y una temperatura de 350 °C. Los procesos para los cuales se utiliza el vapor trabajan a una presión de 5 bar y a la temperatura de saturación del vapor que le corresponde a dicha presión. Posteriormente se recoge todo el condensado en un colector y se conduce al tanque de agua de alimentación desde donde es elevado a la presión de trabajo del intercambiador de acople.

Para la estimación del flujo de agua sanitaria, también se tuvo en cuenta el tiempo de trabajo de los establecimientos. Para conocer aproximadamente el tiempo máximo en el que pudieran ser consumidos las cantidades de agua de cada sitio. Para las viviendas unifamiliares y el hotel se propusieron 24 horas y para los restantes servicios se propuso una jornada laboral de 8 horas. A partir de este criterio se obtuvo el flujo de agua total dando un promedio de $m_{H_2O} = 0,45$ kg/s.

Teniendo en cuenta que la temperatura final deseada para el agua de servicio es de 60 °C, se realizan los cálculos para llevarla inicialmente a 80 °C, asumiendo pérdidas de energía térmica en las líneas de transporte. Para el agua se propuso una densidad de 993,5 kg/m³, con lo que se obtuvo un flujo de 0,45 kg/s.

A partir de la ecuación (7), se calcula la cantidad de calor necesaria para la operación de calentamiento del agua.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (7)$$

Donde:

Q: calor necesario para elevar el agua de 27 °C a 80 °C.

m_{H_2O} : flujo de agua caliente sanitaria.

C_p : calor específico del agua: 4,18 kJ/kg K

Se obtuvo que $Q = 93,04$ kW.

Aplicando la ecuación (8), se obtuvo la demanda de vapor que debe ser cubierta para los fines ya mencionados.

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot h_{fg} \quad (8)$$

Donde:

$Q = 93,04$ kW

h_{fg} : entalpía de cambio de fase del vapor a 5 bar: 2 108,5 kJ/kg.

Finalmente, se obtiene el flujo de vapor necesario para cubrir una demanda de 0,044 kg/s. Para asegurar la cobertura y fluctuaciones futuras, se considera un posible incremento de la demanda de un 30 %, llegándose definitivamente a una necesidad de producir 0,057 kg/s de vapor.

A partir de la información recopilada se pudo obtener el valor de la demanda de vapor mediante la ecuación (8), obteniéndose $m_{v2} = 0,17$ kg/s y afectándolo por un coeficiente de reserva de $f = 1,5$ nos queda que $m_{v2} = 0,25$ kg/s.

El flujo total de vapor necesario para cocción y calentamiento de agua nos queda $m_{v1} + m_{v2} = 0,306$ kg/s.

Según el flujo total que llega al colector $m_{v \text{ colector}} = 0,49$ kg/s, nos queda para el secado de biomasa un flujo de $m_{v3} = 0,19$ kg/s.

Para la demanda de vapor de cocción, se escogieron Marmitas de 375 litros, con una demanda de 7,8 kW cada una y eficiencia del 80 %. En la tabla 2, se muestran la cantidad de marmitas empleadas por establecimiento y la cantidad de kW demandados.

Tabla 2. Demanda de energía térmica por conceptos de cocción. Fuente: autores

Establecimiento	Cantidad	Cantidad Marmitas	Demanda (kW)
Hotel	1	7	54,6
Restaurantes	5	25	195,0
Cafeterías	2	4	31,2
		Total	280,8

3. Resultados y Discusión

En la figura 6, se presenta el posible modelo de instalación, a utilizar en la comunidad Las Terrazas, el cual va acoplado al ciclo Brayton mediante el intercambiador de calor.

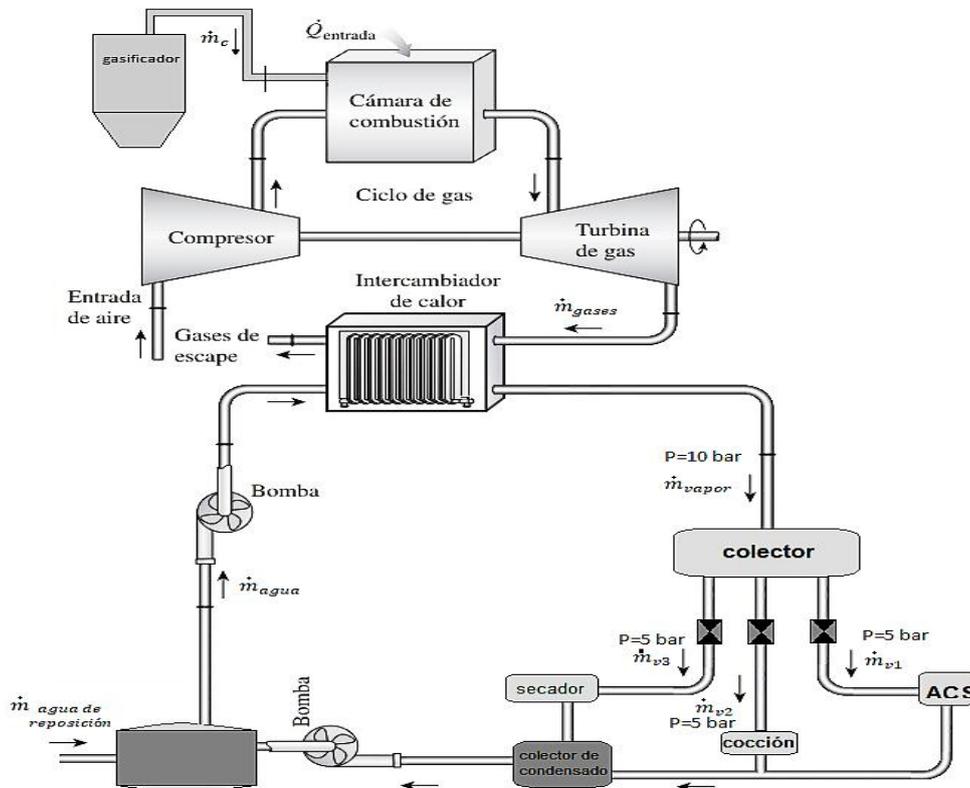


Fig. 6. Ampliación del sistema con los procesos a los que se destina la producción de vapor. Fuente: autores

En la tabla 3 se puede observar la composición del gas producto de la gasificación a la salida del reactor termoquímico.

Tabla 3. Composición del gas síntesis a la salida del gasificador. Fuente: autores

Gas pobre (composición)	CO ₂	CO	HS	H	CH ₄	N	H ₂ O
%	41,53	8,15	0,023	2,56	5,69	20,80	21,24
Flujo (kg/s)	0,093	0,018	0,00005	0,006	0,013	0,046	0,047
Concentración (kg/m ³)	0,129	0,025	0,00007	0,008	0,0178	0,065	0,066

Los resultados del balance de masa y de energía en el gasificador (P1/GSF-101), se muestran a continuación, además se obtuvo el valor del poder calorífico bajo del gas de síntesis llegando a alcanzar 5,87 MJ/m³.

Resultados del balance de masa en el gasificador (kg/s)

\dot{m}_{comb}	\dot{m}_{aire}	\dot{m}_{gas}	\dot{m}_{cen}
0,24	0,1	0,224	0,077

Resultados del balance de energía en el gasificador (kW)

$m_{comb} * PCI_{comb}$	$m_{aire} * h_{aire}$	$m_{gas} * PCI_{gas}$	$m_{gas} * h_{gas}$
4 488,00	2,53	1 434,72	46,48

En el caso de los resultados obtenidos al aplicar el modelo presentado anteriormente para el análisis del bloque de potencia eléctrica, empleando el software *SuperPro Designer*, se obtuvo que la turbina pudo entregar una potencia de 1 015,77 kW, pero el 32 %, o sea 326,411 kW, fueron para el funcionamiento del compresor. Para la entrega útil de generación de energía eléctrica se tienen 690 kW, aproximadamente. Considerando una eficiencia del generador eléctrico del 90 %, la instalación posee una potencia eléctrica de 620,42 kW.

En la tabla 4, se pueden observar los resultados obtenidos de los cálculos realizados durante la simulación, del flujo, composición, concentración y principales parámetros de los gases de escape de la turbina.

Tabla 4. Resultados del flujo, composición, concentración y principales parámetros de los gases de escape de la turbina. Fuente: autores

Elementos	Flujo (kg/s)	Composición (%)	Concentración (kg/m ³)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/s)	Flujo (kg/s)
CO ₂	0,15628	12,2480	0,042914	703,9	1 413,75	1,276
HS	0,00005	0,0040	0,000014			
N	0,85393	66,9239	0,234485			
O	0,13855	10,8586	0,038046			
H ₂ O	0,12716	9,9655	0,034917			

Según los resultados obtenidos, se realizó un ejercicio de verificación para un posible uso de los gases de escape de la turbina para alimentar un ciclo Rankine (ciclo combinado), pero se llegó a la conclusión de que el flujo de vapor que se generaría, no alcanza para la puesta en funcionamiento de una turbina de vapor. Por ello, se hizo un estudio para la producción de vapor para otros fines, cocción, agua caliente sanitaria y la posibilidad de una cámara de secado para el proceso de gasificación, lo cual aumenta la eficiencia del sistema considerablemente. Se logra una producción de vapor de 1 200 kg/h con una temperatura de 350 °C y a una presión de 10 bar.

En la tabla 5, se muestra la cantidad establecimientos por categoría presentes en la comunidad que pudieran emplear vapor para su funcionamiento, además se muestra la cantidad de litros de agua que fueron calculados en función de los datos ya obtenidos mediante la revisión bibliográfica y las suposiciones realizadas.

Tabla 5. Datos recopilados sobre consumo de agua caliente sanitaria por establecimiento. Fuente: autores

Establecimiento	Cantidad	Cantidad camas	Cantidad personas	Cantidad comidas	Litros/día
Viviendas unifamiliares			1 000		30 000
Hotel La Moka	1	45			3 150
Restaurantes	5			400	4 000
Cafeterías	2			160	320
Oficinas	2		8		24

A manera de comparación con resultados reportados en la literatura, se puede citar que los valores obtenidos por Chiñas-Palacios [2] son similares en cuanto a por ciento de convección de la biomasa en energía. Díaz González C, et al, [3] realizaron su trabajo empleando un pretratamiento de la materia prima antes de entrar al sistema de gasificación lo que les trajo un aumento de la eficiencia y una disminución en el consumo, pero aun así los resultados arrojados son similares al de nuestro trabajo.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran valores mayores que los obtenidos en los trabajos tomados como referencia para la comparación. Esto es debido a la utilización de los gases de escape para la generación de vapor (energía térmica) así aumentando la eficiencia del sistema de convección de la biomasa en energía eléctrica y/o térmica.

El trabajo desarrollado tiene como limitante que no fue posible realizar experimentos de análisis químico elemental a los residuos forestales para obtener la composición y el poder calórico de los mismos.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se propone un sistema de gasificación para el aprovechamiento de los residuos forestales como materia prima, acoplada con un ciclo de potencia para la generación de energía eléctrica y/o térmica mediante un intercambiador de calor para aprovechar el poder calórico de los gases de escape. La implementación de este sistema es capaz de cubrir 100 % de la demanda de energía eléctrica de la comunidad rural eco-turística y a su vez se propone el uso de la energía térmica, generada por el sistema, vapor para la cocción de alimento y para el sistema de agua sanitaria de varias instalaciones de servicio del complejo influyendo así en un cambio en la matriz energética del sistema con el aumento del uso de las fuentes renovables de energía.

Agradecimientos

Agradecemos, al proyecto Renewable energy and bioclimatic architecture improving sustainability and development in ecotouristic settlement: Las Terrazas, de la Universidad de Gante; financiado por el grupo de apoyo a las universidades de la región de Flandes, en Bélgica, por el acceso a bases de datos especializadas y gastos logísticos,

Referencias

1. Strzalka R, Schneider D, Eicker U. Current status of bioenergy technologies in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;72:801-820. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.091>
2. Chiñas Palacios C, Aguila Leon J, Hurtado Perez E. A cascade hybrid PSO feed-forward neural network model of a biomass gasification plant for covering the energy demand in an AC microgrid. *Energy Conversion and Management*. 2021;232:113896. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113896>
3. Díaz Gonzalez CA, Pacheco Sandoval L. Sustainability aspects of biomass gasification systems for small power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;134:110180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110180>
4. Oliva Merencio D, Pereda Reyes I. Biogás y Sostenibilidad en Cuba. *Revista Universidad y Sociedad*. 2022;14:597-609.
5. Schicker PC, Spayde D, Cho H. Design and Feasibility Study of Biomass-Driven Combined Heat and Power Systems for Rural Communities. *Energy Sources Technol*. 2022;144:10. <https://doi.org/10.1115/1.4053345>
6. Linbo Y, Guangki Y, Boshu H. Thermodynamic analyses of a biomass-coal co-gasification power generation system. *Bioresource Technology*. 2016;205:133-141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.049>
7. Rahbari A, Venkataraman MB, Pye J. Energy and exergy analysis of concentrated solar supercritical water gasification of algal biomass. *Applied Energy*. 2018;228:1669-1682. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.002>
8. Lunguleasa A, Spirchez C, Zeleniuc O. Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical wood species. *Maderas Ciencia y tecnología*. 2020;22:269-280. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000302>
9. Gruber L, Seidl L, Zanetti M, Schnabel T. Calorific Value and Ash Content of Extracted Birch Bark. *Forests*. 2021;12:1480. <https://doi.org/10.3390/f12111480>
10. Ngangyo Heya M, Foroughbakhch Pournavab R, Carrillo Parra A, Zelinski V, Salas Cruz LR. Elemental Composition and Flue Gas Emissions of Different Components from Five Semi-Arid Woody Species in Pyrolysed and Non-Pyrolysed Material. *Sustainability*. 2019;11:1245. <https://doi.org/10.3390/su11051245>
11. Bozym M, Gendek A, Siemiatkowski G, Aniszewska M, Malat'ák J. Assessment of the Composition of Forest Waste in Terms of Its Further Use. *Materials*. 2021;14:973. <https://doi.org/10.3390/ma14040973>
12. Solar J, Caballero BM, Barriocanal C, Lopez Urionabarrenechea A, Acha E. Impact of the Addition of Pyrolysed Forestry Waste to the Coking Process on the Resulting Green Biocoke. *Metals*. 2021;11:613. <https://doi.org/10.3390/met11040613>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Eduardo Miguel Matheu Muñiz. <https://orcid.org/0000-0002-6187-2481>

Realizó el diseño de la investigación y la revisión del estado del arte. Trabajó en la recolección y el procesamiento de los datos para el estudio. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los indicadores biofísicos y en el análisis de los resultados. Participó en la elaboración y simulación del sistema propuesto para el tratamiento de residuos, así como del análisis de los resultados obtenidos en dicha simulación y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Ileana Pereda Reyes. <https://orcid.org/0000-0001-6517-4202>

Participó en el diseño de la investigación y en la revisión del estado del arte. Trabajó en la recolección y procesamiento de los datos para el estudio y diseño de la investigación y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Deny Oliva Merencio. <https://orcid.org/0000-0001-8117-3605>

Participó en el diseño de la investigación y en la revisión del estado del arte. Trabajó en la recolección de los datos. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los indicadores biofísicos y en el análisis de los resultados, así como en la elaboración del sistema propuesto para el tratamiento de residuos, así como del análisis de los resultados obtenidos en dicha simulación y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Cesar Arnaldo Cisneros Ramírez. <https://orcid.org/0000-0002-9969-801X>

Apoyó en la revisión del estado del arte y diseño de la investigación y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Arnold Jannsen. <https://orcid.org/0000-0003-4950-4704>

Apoyó en la revisión del estado del arte y diseño de la investigación y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.