

Valoración energética experimental de residuos producidos en la industria apícola

¹Diego Contreras Bilbao

²Einara Blanco Machin

³Daniel Travieso Pedroso

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: dcontreasb@udec.cl

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: eblanco@udec.cl

³Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Bío Bío, Chile. Email: dtrevieso@ubiobio.cl

Resumen

El presente trabajo busca evaluar experimentalmente el potencial energético de un residuo producido en la industria de la cera apícola conocido como “orujo”. Los ensayos incluyen la determinación del análisis proximal y elemental, los cuales se compararon con valores teóricos obtenidos en investigaciones previas. Estos ensayos arrojaron porcentajes elevados de carbono (71,23% masa) e hidrógeno (11,45% masa) en comparación a biomásas típicas estudiadas en la literatura; además el poder calorífico superior fue de 24,97 MJ/kg, lo cual es un gran indicio de su potencial como combustible. Sin embargo se encontró una cantidad de azufre elevada (2,17% masa), lo cual puede originar distintos contaminantes. También se realizaron ensayos de gasificación con el orujo, en los cuales el gas de síntesis generado tuvo un poder calorífico promedio de 5,75 MJ/Nm³, encontrándose dentro de los más altos entre biomásas y residuos típicos estudiados.

Palabras claves: Valoración energética, residuos, gasificación, updraft

Abstract

The present work seeks to experimentally evaluate the energy potential of a waste produced in the bee wax industry known as “slumgum.” The tests include the determination of the proximal and elemental analysis, which were compared with theoretical values obtained in previous research. These tests showed high percentages of carbon (71.23% mass) and hydrogen (11.45% mass) compared to typical biomasses studied in the literature; Furthermore, the highest calorific value was 24.97 MJ/kg, which is a great indication of its potential as fuel. However, a high amount of sulfur was found (2.17% mass), which can cause different contaminants. Gasification tests were also carried out with the pomace, in which the synthesis gas generated had an average heating value of 5.75 MJ/Nm³, being among the highest among biomasses and typical wastes studied.

Keywords: Energy assessment, waste, gasification, updraft

1 Introducción

Debido al constante aumento de la demanda energética a nivel mundial, a los problemas ambientales asociados al uso de los combustibles fósiles y a su cada vez más escasa disponibilidad, en los últimos años se ha impulsado la implementación de tecnologías limpias para la generación de energía. Entre estas, la biomasa residual

representa una opción con un gran potencial como combustible, pudiéndose considerar como carbono neutral [1]. Múltiples materias primas pueden ser designadas como biomasa, por ejemplo, desechos agrícolas, aceites, restos de animales, leña, desechos municipales, grasas, entre otros [2]. La producción de energía a partir de biomasa o residuos puede mitigar el cambio climático, reducir las emisiones de gases de

efecto invernadero, promover la sostenibilidad ambiental y mejorar la salud de las personas [3].

En la literatura se han investigados distintos tipos de biomásas y residuos con fines energéticos. Karpan et al. [4] produjeron un combustible derivado de residuos, compuesto por 3 tipos de biomásas y por 5 tipos de residuos peligrosos, el cual tiene como fin alimentar hornos de fabricación de cemento. El combustible producido tiene un poder calorífico de 18,652 MJ/kg, además por cada kilogramo quemado se obtiene una reducción aproximada de 2,25 kg de CO₂ respecto al carbón utilizado convencionalmente en los hornos. Infiesta et al. [5] diseñaron y construyeron un prototipo de una planta de procesamiento de residuos sólidos, creando un combustible a partir de residuos sólidos urbanos (RSU). El combustible de residuos producido tiene un poder calorífico inferior de 14,6 ± 1,3 MJ/kg, y según los autores la energía necesaria para producir este combustible representa solo un 14% de la energía eléctrica generada por la planta de energía térmica. Sagastume Gutiérrez et al. [6] realizaron un inventario de los principales residuos que se producen en la industria pecuaria y agrícola en Colombia, determinando su potencial de uso en sistemas de digestión anaerobia y en combustión directa, demostrando el mayor potencial de esta última. Los resultados muestran que el potencial bioenergético alcanza entre 60.000 y 120.000 GWh por año y que el uso combinado de combustión directa y digestión anaerobia puede satisfacer la demanda de combustibles fósiles gaseosos y líquidos desde el 50% hasta el 97%.

Los métodos principales para obtener energía a partir de la biomasa son los procesos bioquímicos y los procesos termoquímicos, siendo esta última más utilizada a nivel industrial debido a su mayor eficiencia y rapidez de conversión de la biomasa [7]. Las tecnologías de conversión habituales son la combustión, gasificación y pirólisis; de las cuales la combustión destaca por ser la más utilizada debido a su facilidad de implementación [8], sin embargo, el proceso termoquímico con mayor potencial para recuperar energía corresponde a la gasificación [9]. Existen distintas investigaciones teóricas y experimentales destinadas a estudiar la conversión termoquímica de biomasa mediante las tecnologías de combustión y gasificación. Junga et al. [10] estudiaron de forma experimental la co-gasificación de paja de trigo y estiércol de gallinas ponedoras en un gasificador de tipo updraft, midiendo un poder calorífico inferior entre 3,3 MJ/m³ y 3,4 MJ/m³, para un rango de relaciones de aire-combustible de 0,3-0,45. Domínguez et al. [11] diseñaron un modelo computacional en Aspen Plus el cual fue evaluado con datos experimentales. En la experimentación se utilizó una mezcla de RSU como materia prima para alimentar un gasificador updraft con un diseño especialmente modificado para reducir el contenido de alquitrán en el gas de síntesis. El modelo

realizado entregó un error de 12.2% para el poder calorífico del gas de síntesis. Kuttin et al. [12] estudiaron la gasificación de cáscara de palmiste torrefacta utilizando una mezcla de vapor y CO₂ como agente gasificante. Al aumentar la relación vapor/CO₂ de 0.2 a 4.0 se produjo un aumento en el contenido de H₂ de 13.4% y una reducción del contenido de alquitrán de un 21.4%. Diba et al. [13] mediante la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional analizaron la combustión de pellet de madera y hueso de aceituna en un reactor de lecho fluidizado burbujeante, encontrando una razonable concordancia entre el modelo desarrollado y los resultados encontrados en la literatura. Kaynak et al. [14] utilizaron como combustible carozo (o hueso) de durazno y damasco, estudiando de forma experimental su combustión en reactor de lecho fluidizado burbujeante. Las eficiencias de combustión obtenidas oscilaron entre 96% a 97.5% para el carozo de durazno y 93.4% a 96.3% para el carozo de damasco. No se reportaron emisiones de SO_x para ambos combustibles, sin embargo el elevado nivel de CO emitido hizo necesario agregar una segunda entrada de aire al sistema.

Como ha quedado claro con la revisión del estado del arte, la utilización de residuos o biomasa puede ser una alternativa importante a la hora de buscar nuevas fuentes energéticas. Dentro de este contexto, en la industria de la apícola se genera un residuo orgánico sólido conocido como “orujo apícola”, el cual no tienen un uso preestablecido. Actualmente en la literatura no existen investigaciones experimentales que estudien el orujo apícola con fines energéticos; solo unas pocas publicaciones analizan este residuo en aplicaciones agrícolas [15-17]. En una investigación anterior de los autores [18], este residuo fue estudiado de forma teórica en un proceso de combustión, calculado sus distintas propiedades fisico-químicas mediante correlaciones matemáticas y datos encontrados en la literatura. El objetivo principal del presente artículo es realizar una comparación entre las propiedades fisico-químicas del orujo calculadas de forma teórica y las obtenidas experimentalmente (publicadas en este artículo), discutiendo si este residuo tiene potencial como combustible para ser utilizado en procesos de conversión termoquímicos. Adicionalmente, se reportarán los resultados obtenidos en ensayos preliminares de gasificación en los cuales se utiliza orujo apícola como materia prima, sirviendo como base para ensayos futuros.

2 Materiales y métodos

2.1 Antecedentes del orujo apícola

2.2.1 Descripción general del residuo

En la industria apícola, después de que la miel ha sido extraída de los marcos, estos son llevados a una planta de

recuperación de cera, donde son depositados en un recipiente metálico y bañados con el vapor generado en una caldera, la cual generalmente es alimentada con combustibles fósiles. Luego, la cera de los marcos es fundida y pasa a través de una malla coladora en el fondo del recipiente, almacenándose posteriormente para su tratamiento. Durante esta etapa de filtrado, la cera es despojada de todas las impurezas que la acompañan, las cuales no pueden pasar a través del tamiz, constituyendo un residuo de color oscuro [19] conocido como “orujo apícola”. El orujo es un residuo orgánico sólido de aspecto intermedio entre el estiércol animal y el compost vegetal, compuesto principalmente por larvas, excrementos de abejas y mudas, cera no extraída, polen, propóleos, entre otros. Generalmente se almacena al aire libre y no tiene un uso particular, a veces se utiliza como material fertilizante. En la **Figura 1** se muestra una pila de orujo almacenada al aire libre en la propia planta apícola.



Figura 1: Pila de orujo almacenada al aire libre
Referencia: [17]

El almacenamiento del orujo en grandes cantidades y por periodos prolongados conlleva a problemas de higiene, ya que es un residuo orgánico que se descompone, provocando malos olores y la propagación de bacterias. Además, el hecho de que este residuo no tenga un uso preestablecido ocasiona problemas logísticos, ya que en ocasiones se deben destinar vehículos especiales para transportarlo fuera de la planta apícola. Con base en lo anterior, surge la oportunidad de darle un valor agregado a este residuo, pudiendo ser utilizado para satisfacer las necesidades energéticas de la propia planta apícola.

En Chile sólo el 5,35% de los apicultores se dedica a la producción de cera, industria responsable de la formación del orujo, lo que lleva a una centralización en la producción de este residuo. Las tres regiones chilenas con mayor número de apicultores dedicados a la industria de la cera son La Araucanía (17%), Maule (17%) y Valparaíso (12%) [20], lo cual muestra una “tendencia” de mayor producción de orujo en estas regiones. La palabra “tendencia” se destaca porque se habla del número de apicultores y no de la producción total de cera generada por estos, por lo que existe la posibilidad de que un apicultor pueda superar ampliamente la producción de cera de sus pares. Actualmente no existen registros

actualizados de producción de cera en el país, ni mucho menos de la producción de orujo, pero es posible realizar estimaciones en base a la producción de miel. Considerando que la producción de miel en Chile tiene un promedio de 10.000 toneladas anuales [20], que por cada 10 kg de miel producida se obtiene 1 kg de cera [21], y que la eficiencia de extracción de este producto es aproximadamente un 60% [16]; entonces en el país se puede estimar una producción aproximada de 666,7 toneladas de orujo apícola al año [18].

2.2.2 Cálculo de propiedades físico-químicas del orujo, método teórico

Como se mencionaba anteriormente, la poca literatura existente respecto al orujo lo estudia en aplicaciones agrícolas, sin usos relacionados a la generación de energía. El trabajo más destacable respecto al orujo corresponde a la tesis doctoral de Gómez [17], en donde este residuo se valoriza a través de su uso en cultivos. En la presente investigación se utilizarán datos experimentales obtenidos por Gómez [17] para completar mediante correlaciones matemáticas el análisis elemental y proximal del orujo, además de calcular su poder calorífico. Los datos de entrada utilizados en las correlaciones matemáticas son los porcentajes en peso de humedad, cenizas, materia orgánica (carbono fijo + material volátil), carbono, nitrógeno y azufre; todos determinados de forma experimental en el trabajo de Gómez [17] con muestras de orujo tomadas en España, las cuales hay que tener presente que pueden tener distinta composición respecto a las producidas en Chile.

Para obtener el resto de propiedades del orujo se utilizará la **Ecuación (1)** [22], la cual relaciona el análisis último como una función del análisis proximal, y la **Ecuación (2)** [23], con la cual es posible obtener el poder calorífico superior en función del análisis próximo.

$$\begin{aligned} \text{(I)} \quad C &= -35,9972 + 0,7698VM + 1,3269FC + 0,3250ASH \\ \text{(II)} \quad H &= 55,3678 - 0,4830VM - 0,5319FC - 0,5600ASH \\ \text{(III)} \quad O &= 223,6805 - 1,7226VM - 2,2296FC - 2,2463ASH \\ \text{(IV)} \quad O &= 100\% - C - H - N - S - ASH \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} HHV &= 20,7999 - 0,3214 \left(\frac{VM}{FC} \right) + 0,0051 \left(\frac{VM}{FC} \right)^2 \\ &\quad - 11,2277 \left(\frac{ASH}{VM} \right) + 4,4953 \left(\frac{ASH}{VM} \right)^2 \\ &\quad - 0,7223 \left(\frac{ASH}{VM} \right)^3 + 0,0383 \left(\frac{ASH}{VM} \right)^4 \\ &\quad + 0,0076 \left(\frac{FC}{ASH} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

En estas ecuaciones VM, FC y ASH representan los porcentajes máscos de material volátil, carbono fijo y ceniza, respectivamente. En la **Ecuación (1)** C, H, O, N y S se refieren a los porcentajes máscos de carbono,

hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, respectivamente. Cabe señalar que en la **Ecuación (1)** es posible obtener O mediante (III) o (IV), siendo esta última preferible cuando los valores de N y S se conocen de antemano [22]. Finalmente, en la **Ecuación (2)** HHV representa el poder calorífico superior medido en MJ/kg. Cabe destacar que todos los valores anteriores se miden en base seca.

2.2.3 Análisis experimentales

Se tomaron muestras de orujo en la planta apícola administrada por la Cooperativa Apícola el Quillay, ubicada en la comuna de San Clemente, VII región, Chile. Las muestras fueron analizadas por el Laboratorio de Análisis Químico del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción (Chile), en donde se determinó el Análisis Elemental y el Análisis Proximal del residuo.

2.2 Proceso de gasificación

2.2.1 Descripción general del sistema

El gasificador utilizado para tratar el orujo es del tipo updraft, el cual fue diseñado y construido en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción, Chile. Este gasificador presenta una modificación en su diseño respecto al tipo updraft tradicional, la cual tiene como objetivo principal disminuir el contenido de alquitrán en el gas de síntesis, tal como fue demostrado en el trabajo de Pedroso et al. [24]. En la **Figura 2-(a)** se muestra esquemáticamente un proceso de gasificación updraft tradicional, en el cual la materia prima entra por la parte superior y el aire por la parte inferior del reactor; mientras que en el reactor modificado esquematizado en la **Figura 2-(b)**, la materia prima ingresa por la parte inferior al igual que el aire principal, además se añade una segunda entrada de aire en la parte media del reactor para mejorar el proceso de combustión. En el diseño modificado, el gas producido en la región de desvolatilización se ve obligado a pasar por las zonas de combustión y reducción antes de abandonar el reactor, produciendo el craqueo térmico de gran parte del alquitrán.

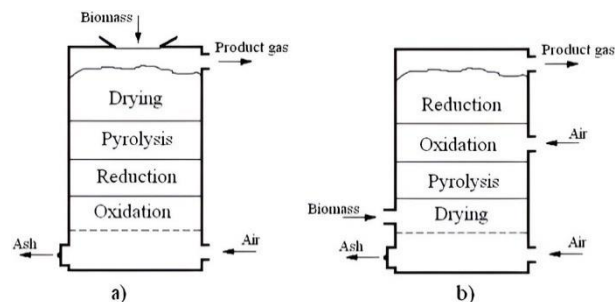


Figura 2: Gasificador updraft: a) Diseño tradicional. b) Diseño modificado

Fuente: [24]

En la **Figura 3** se muestra el esquema del sistema instalado en el Laboratorio de Termofluidos. El gasificador posee una tolva (1) de 190 litros donde se almacena combustible. El combustible es impulsado mediante un tornillo sin fin (2) hasta la parrilla (3). Previo a esto el reactor también es cargado con combustible, se destapa el reactor (10) y se realiza un encendido manual utilizando alcohol. El agente gasificante corresponde a aire, se tiene una entrada principal de aire (8) y una entrada secundaria (9), ubicadas al inferior y por sobre la parrilla respectivamente. Cuando ya se realiza la gasificación, el gas de síntesis se dirige por el tubo de salida del reactor (4) pasando por un ciclón (5) para extraer las partículas más pesadas. Por último, el gas generado es combustionado empleando un quemador de gas natural (7). Para el almacenamiento de residuos se tienen dos depósitos de residuos, uno es el cenicero (11), ubicado en el sector inferior del reactor y un tambor debajo del ciclón (12).

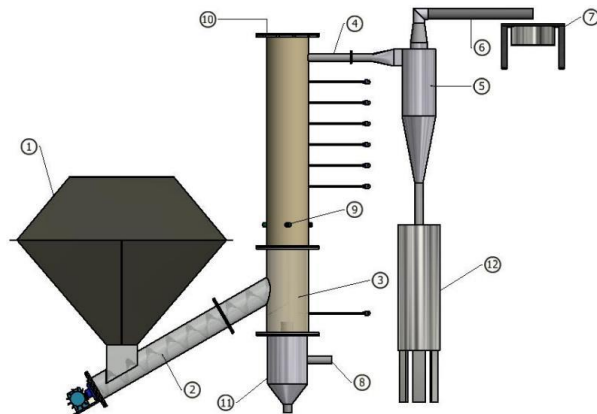


Figura 3: Esquema del sistema de gasificación

2.2.2 Sistema de medición

En la Figura 4 se muestra una fotografía del sistema de gasificación, destacando los equipos e instrumentos de medición. Para el perfil de temperaturas el reactor cuenta con 7 termocuplas, además hay 1 ubicada en la salida de los gases desde el reactor hacia el ciclón y otra bajo la parrilla. Todas las termocuplas son del tipo K y tienen una precisión de 1 °C y un error instrumental de $\pm 1,5$ °C. Las termocuplas se conectan a un sistema de adquisición de datos (datalogger) (1), el cual muestra en pantalla las temperaturas y grafica las mediciones registradas por el equipo, almacenando esta información en su memoria.

Para medir la composición del gas, a la salida del ciclón una fracción del gas se desvía (2), observar Figura 5.2. El gas es enfriado con agua (3) para luego pasar al analizador portátil de syngas TY-6330P (4), este posee un

dispositivo de acondicionamiento de gas para eliminar polvo, alquitrán y vapor de agua del gas de muestra (5).

Para medir el flujo de aire que se envía al reactor, en la entrada primaria se instala una válvula de mariposa de ½” y junto a la válvula se instala un flujómetro que entrega el caudal suministrado en litros por minuto (6). Mientras que en la entrada secundaria se instala una válvula de bola ½” (7).



Figura 4: Fotografía del sistema de gasificación. Se destacan los instrumentos y equipos de medición

3 Resultados

3.1 Comparación de las propiedades del orujo

Mediante la resolución de las **Ecuaciones (1) y (2)** se obtiene el análisis proximal, análisis elemental y el HHV del orujo apícola, los cuales se muestran en la **Tabla 1**. Adicionalmente en la **Tabla 1** se presenta una comparación con distintos tipos de biomásas estudiadas en la literatura. La aplicabilidad de las **Ecuaciones (1) y (2)** se confirma debido a que los diferentes parámetros de entrada y los resultados obtenidos (HHV, VM, FC, ASH, C, H, O, N y S) se encuentran dentro de los respectivos rangos en los que se tomaron las muestras de biomasa para elaborar estas ecuaciones [22] [23].

Tabla 1: Propiedades relevantes para la combustión del orujo apícola y otras biomásas (% en peso de combustible seco)

Parámetro	Orujo apícola, experimental (este trabajo)	Orujo apícola, teórico [18]	Cáscara de arroz [25]	Paja de trigo [26]	Coronta de choclo [26]	Residuos de madera triturada [27]	Lodos de depuradora [28]
Análisis proximal (%)							
Carbono fijo	<i>No determinado</i>	27,85	8,04	10,29	6,54	21,1	11,9
Material volátil	<i>No determinado</i>	54,82	61,78	83,08	91,16	76,3	72,1
Cenizas	5,16	17,33*	30,18	6,63	2,3	2,6	16
Total	-	100	100	100	100	100	100
Humedad (%)							
	20,28	6,87	4,55	12,81	12,77	10,5	7
Análisis elemental (%)							
C	71,23	48,79*	37,65	38,34	42,1	51,9	38,3
H	11,45	4,37	5,13	5,47	5,9	5,7	5
N	3,52	5,42*	1,63	0,6	0,5	0,4	3,4
S	2,17	0,32*	0,181	0,37	0,48	0,03	<0,05
O	6,47	23,77	55,4	48,6	48,72	39,37	37,3
Cenizas	5,16	17,33*	30,18	6,63	2,3	2,6	16
Total	100	100	100	100	100	100	100

Poder calorífico superior (MJ/kg)	24,97	17,08	13,98	14,68	16,0	21,05	14,1
*Data obtenido de forma experimental por Gómez [17]							

En primera instancia es preciso comparar las propiedades del orujo obtenidas de forma experimental y las calculadas de forma teórica. También se debe recordar que en la Tabla 1 las propiedades del orujo marcadas con un “*” fueron determinadas de forma experimental en el trabajo de Gómez [17], quien estudió muestras de orujo producidas en España. En cuanto al análisis elemental, de la **Tabla 1** se puede ver que los resultados experimentales realizados en el presente trabajo arrojaron valores considerablemente mayores para el C y el H, lo cual resulta beneficioso pensando en un uso energético para el orujo, es más, las cantidades de C y H obtenidas son mayores a las reportadas en la **Tabla 1** para el resto de residuos. Sin embargo, la cantidad de S obtenida de forma experimental en este trabajo es cerca de 7 veces superior al valor obtenido también de forma experimental por Gómez [17], lo cual indica una diferencia en la composición del orujo producido en Chile y España. Debido a la distinta flora, fauna, métodos de producción, clima, entre otros factores; es normal que la miel y todos sus derivados (cera, orujo) tengan distinta composición. El mayor contenido de S obtenido en este trabajo puede resultar preocupante, ya que podría aumentar la cantidad de contaminantes en el proceso de combustión del orujo desencadenado por la posible combinación del S con H y O. Para las biomásas presentadas en la Tabla 1 el orujo contiene la mayor cantidad de S, por lo tanto dependiendo del uso que se le quiera dar a este residuo, es necesario revisar la normativa correspondiente para determinar el valor máximo permitido de S. El contenido de cenizas obtenido de forma experimental en este trabajo es considerablemente menor al que obtuvo Gómez [17], lo cual también refleja la diferencia entre las propiedades del orujo producido en Chile y España. La cantidad de cenizas es un factor importante a considerar si se quiere utilizar al orujo como combustible, ya que un elevado contenido de cenizas puede generar aglomeraciones, corrosión y erosión aceleradas, cenizas volantes y fusión de cenizas por altas temperaturas. Por otro lado, la humedad determinada en este trabajo resultó ser mayor que todos los valores reportados en la **Tabla 1**, por lo tanto dependiendo de la tecnología de conversión utilizada, quizás sea necesario realizar un proceso de secado previo al orujo para garantizar su uso como combustible. Finalmente en cuanto al poder calorífico, el valor experimental obtenido es considerablemente mayor a las biomásas expuestas en la **Tabla 1**, lo cual indica que este residuo podría utilizarse perfectamente en un sistema de combustión sin necesidad de proporcionar calor a partir de un combustible auxiliar.

3.2 Gasificación del orujo

La gasificación del orujo se llevó a cabo en el sistema expuesto en la **Sección 2.2**, sin embargo, debido a inconvenientes con el sistema de alimentación (tornillo sin fin), fue necesario realizar algunos ajustes en el plan de ensayos. Ya que no fue posible alimentar el reactor con una entrada continua de combustible, se decidió cargar el reactor con una cantidad fija de materia prima, según la distribución mostrada en la **Figura 5**. En la parte superior del reactor, entre las termocuplas 3 y 4, se añadió una capa de pellet de pino comercial de la marca ECOMAS, con el objetivo de asegurar el encendido del reactor. Posteriormente en sentido descendente, entre las termocuplas 4 y 6 se agregó una zona de orujo apícola, la cual es el objetivo de estudio en esta investigación. Por debajo de la zona de orujo, entre las termocuplas 6 y 7 se añadió otra capa de pellet comercial ECOMAS, para asegurar una estabilidad al término del proceso de gasificación de la zona de orujo. Finalmente, desde la termocupla 7 hasta el fondo del reactor se rellena con cartón, ya que este se consume rápidamente y por lo tanto el reactor demora menos tiempo en apagarse. Se debe recordar que solo es de interés estudiar el comportamiento del orujo, no del pellet comercial ni del cartón. El reactor no cuenta con un visor para determinar que capa de materia prima es la que se está consumiendo, por lo tanto mediante el aumento de temperatura en las termocuplas se tendrá un indicio del nivel actual de materia prima al interior del reactor.

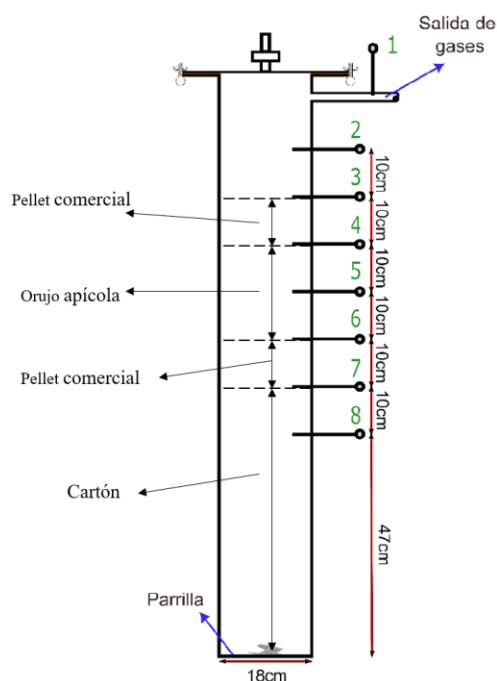


Figura 5: Distribución de materia prima utilizada en los ensayos de gasificación

Los resultados preliminares expuestos en el presente artículo dan cuenta del poder calorífico del gas de síntesis obtenido de la gasificación del orujo, el cual se grafica en función del tiempo de ensayo en la **Figura 6**. El tiempo total del ensayo desde que se encendió el reactor hasta que se consumió todo el material fue de aproximadamente 100 minutos, pero en la **Figura 6** solo se muestra el periodo asociado a la gasificación del orujo. Este periodo fue estimado en función del aumento de temperatura medido entre las termocuplas 4 y 6, tal como se describió en la **Figura 5**.

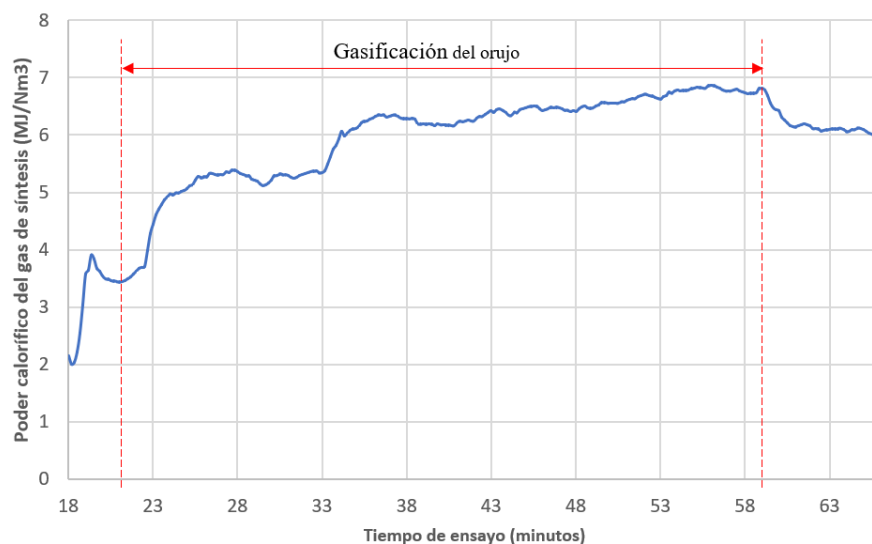


Figura 6: Poder calorífico del gas de síntesis en función del tiempo de ensayo

En la **Figura 6** se puede apreciar el cambio en la pendiente de la curva cuando la capa de gasificación pasa de pellet comercial a orujo y de orujo a pellet comercial, mostrando un poder calorífico mayor cuando se gasifica orujo. Durante el periodo señalado, el valor más bajo obtenido para el poder calorífico fue de 2,22 MJ/Nm³, mientras que el más alto alcanzó 6,87 MJ/Nm³, con un promedio para todo el tiempo de ensayo de 5,75 MJ/Nm³. Para obtener una cuantificación de los valores obtenidos, en la **Tabla 2** se muestra una comparación entre el poder

calorífico promedio en el gas de síntesis para distintos tipos de biomasa. Como queda demostrado, el orujo posee el segundo poder calorífico mayor del grupo de biomasa expuesto en la **Tabla 2**, corroborando su potencial como combustible. Sin embargo, todavía falta por analizar más parámetros de la gasificación para corroborar la verdadera utilidad del gas de síntesis generado, lo cual se discutirá en la sección de **Conclusiones**.

Tabla 2: Poder calorífico promedio en el gas de síntesis para la gasificación de distintos tipos de biomásas y residuos

	Orujo apícola (este trabajo)	Pellets de madera blanda [29]	Mezcla de envases plásticos [30]	Estiércol de gallina y paja de trigo [10]	Residuos sólidos urbanos [11]
Poder calorífico promedio (MJ/Nm³)	5,75	4,3	6,46	3,35	3,37

4 Conclusiones

En la presente investigación se realizaron ensayos experimentales a un residuo generado en la industria de la cera apícola conocido como “orujo”. Los ensayos incluyen la determinación del análisis proximal y elemental, los cuales fueron comparados con valores experimentales obtenidos de muestras de orujo tomadas en España y otros obtenidos de forma teórica mediante correlaciones matemáticas. La comparación también fue realizada con biomásas típicas encontradas en la literatura. Los resultados experimentales arrojaron valores considerablemente mayores de C, H y HHV en comparación a biomásas tradicionales, lo cual destaca al orujo como un potencial combustible. Sin embargo, también se obtuvo el mayor contenido de S, por lo tanto según la aplicación que se le quiera dar a este residuo, es necesario determinar los porcentajes máximos permitidos de S. En la parte final del documento se realizó un ensayo de gasificación al orujo, el cual arrojó un gas de síntesis con un poder calorífico promedio de 5,75 MJ/Nm³, el cual es de los más altos según la comparación realizada con otros tipos de biomásas. Pese a lo anterior, faltan por realizar ensayos de gasificación para determinar el potencial real del gas de síntesis, por ejemplo ensayos en donde se varía el flujo de aire y temperatura; además de determinar el contenido de alquitrán del gas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID); Programa de Becas/Beca Nacional de Doctorado / 2020-21202256

Referencias

[1] Green C, Byrne KA. Biomass: Impact on Carbon Cycle and Greenhouse Gas Emissions. In: Cleveland CJ, editor. Encyclopedia of Energy. New York: Elsevier; 2004. p. 223-36.

- [2] Karimi-Maleh H, Rajendran S, Vasseghian Y, Dragoi E-N. Advanced integrated nanocatalytic routes for converting biomass to biofuels: A comprehensive review. *Fuel*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122762>
- [3] Kang K, Klinghoffer NB, ElGhamrawy I, Berruti F. Thermochemical conversion of agroforestry biomass and solid waste using decentralized and mobile systems for renewable energy and products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111372>
- [4] Karpan B, Abdul Raman AA, Taieb Aroua MK. Waste-to-energy: Coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;149:655-64. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.009>
- [5] Infiesta LR, Ferreira CRN, Trovó AG, Borges VL, Carvalho SR. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *Journal of Environmental Management*. 2019;236:715-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.017>
- [6] Sagastume Gutiérrez A, Cabello Eras JJ, Hens L, Vandecasteele C. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *Journal of Cleaner Production*. 2020;269. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>
- [7] Azizimehr B, Armaghani T, Ghasemiasl R, Kaabi Nejadian A, Javadi MA. A comprehensive review of recent developments in hydrogen production methods using a new parameter. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;72:716-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.219>
- [8] Oliveira M, Ramos A, Monteiro E, Rouboa A. Modeling and simulation of a fixed bed gasification process for thermal treatment of municipal solid waste and agricultural residues. *Energy Reports*. 2021;7:256-69. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.124>
- [9] Hameed Z, Aslam M, Khan Z, Maqsood K, Atabani AE, Ghauri M, Khurram MS, Rehan M, Nizami A-S. Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110375>

- [10] Junga R, Tańczuk M, Sobek S, Chabiński M, Ziółkowski Ł, Werle S. Effect of the addition of laying hens manure to the straw on gasification efficiency in updraft gasifier under air atmosphere. *Applied Thermal Engineering*. 2023;226:120269. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120269>
- [11] Domínguez JI, Blanco Machín E, Travieso Pedroso D, Wagemman Herrera E, Cuevas Barraza C. Advanced thermoconversion technology for municipal solid waste energetic valorization. *Renewable Energy*. 2024;228:120604. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120604>
- [12] Kuttin KW, Leghari A, Yu H, Xia Z, Ding L, Yu G. Carbon dioxide-steam reforming gasification of carbonized biomass pellet for high syngas yield and TAR reduction through CFD modeling. *Chemical Engineering Science*. 2024;287:119716. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.119716>
- [13] Diba MF, Karim MR, Naser J. Numerical modelling of a bubbling fluidized bed combustion: A simplified approach. *Fuel*. 2020;277:118170. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118170>
- [14] Kaynak B, Topal H, Atımtay AT. Peach and apricot stone combustion in a bubbling fluidized bed. *Fuel Processing Technology*. 2005;86(11):1175-93. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.12.007>
- [15] Morales-Corts R, Gomez-Sanchez MA, Perez-Sanchez R, Prieto-Calvo C. Characterization of beekeeping wastes for using in seedling production. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2010;8(2):493-500. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010082-1216>
- [16] Masaguer A. Uso del compost como componente de sustratos para cultivo en contenedor. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa; 2015.
- [17] Gómez MA. Caracterización de residuos apícolas y análisis de estrategias para su utilización en producción vegetal [PhD thesis]. Salamanca: Universidad de Salamanca; 2011.
- [18] Contreras Bilbao D, Blanco Machin E, Travieso Pedroso D, Blanco Machín A. Theoretical assessment of energy recovery from Beekeeping waste (Slumgum). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;49. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101700>
- [19] Jean-Prost P. Apicultura: Conocimiento de la abeja. Manejo de la colmena. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa; 2007.
- [20] González P. Producción apícola, Chile y Región de la Araucanía. Santiago, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile; 2019.
- [21] CRDP. Estudio de mercado industria apicola chilena. Valdivia, Chile: Consorcio de Desarrollo Tecnológico Apícola; 2014.
- [22] Nhuchhen DR. Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. *Fuel*. 2016;180:348-56. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.058>
- [23] Nhuchhen DR, Abdul Salam P. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*. 2012;99:55-63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>
- [24] Pedroso DT, Machín EB, Silveira JL, Nemoto Y. Experimental study of bottom feed updraft gasifier. *Renewable Energy*. 2013;57:311-6. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.056>
- [25] Ma Z, Ye J, Zhao C, Zhang Q-s. Gasification of Rice Husk in a Downdraft Gasifier: The Effect of Equivalence Ratio on the Gasification Performance, Properties, and Utilization Analysis of Byproducts of Char and Tar. *Bioresources*. 2015;10:2888-902.
- [26] Biswas B, Pandey N, Bisht Y, Singh R, Kumar J, Bhaskar T. Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource Technology*. 2017;237:57-63. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>
- [27] Kurkela E, Kurkela M, Hiltunen I. Steam-oxygen gasification of forest residues and bark followed by hot gas filtration and catalytic reforming of tars: Results of an extended time test. *Fuel Processing Technology*. 2016;141:148-58. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.06.005>
- [28] Barry D, Barbiero C, Briens C, Berruti F. Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*. 2019;122:472-80. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.041>
- [29] Čespiva J, Niedzwiecki L, Vereš J, Skřínský J, Wnukowski M, Borovec K, Ochodek T. Evaluation of the performance of the cross/updraft type gasification technology with the sliding bed over a circular grate. *Biomass and Bioenergy*. 2022;167:106639. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106639>
- [30] Jančauskas A, Striūgas N, Zakarauskas K, Skvorčinskienė R, Eimontas J, Buinevičius K. Experimental investigation of sorted municipal solid wastes producer gas composition in an updraft fixed bed gasifier. *Energy*. 2024;289:130063. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130063>