Potencial de aplicación de biomasa de residuo forestal como fuente de energía renovable

Jorge Bedolla-Hernández[1], Vicente Flores-Lara[2], Marcos Bedolla-Hernández[3], José Michael Cruz-García[4], Efrén Sánchez-Flores[5]*
[1]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, jorge.bh@apizaco.tecnm.mx, [2]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, vicente.fl@apizaco.tecnm.mx, [3]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, marcos.bh@apizaco.tecnm.mx, [4]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, psp.3030@apizaco.tecnm.mx, [5]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, efren.sf@apizaco.tecnm.mx

***Área de participación**: Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*

Resumen

Se presenta el análisis de residuos forestales de tres tipos de árbol, pino, encino y oyamel, como alternativa de fuente de energía. Se consideran residuos de la madera fragmentados y en tiras, típicos resultantes de actividades forestales. Se analiza la disponibilidad de tales residuos para una región boscosa del estado de Puebla. Se toman en cuenta esos tipos de árbol ya que en México los encinos se considera el segundo recurso forestal maderable más importante después del pino. Se analizan los componentes principales de esa biomasa a través de pruebas experimentales, y se determinan valores de presión y temperatura en la generación de vapor por combustión de esa biomasa. El análisis se realiza sobre residuos prácticamente sin procesar, para limitar la cantidad de energía aplicada en el preproceso. Los resultados muestran que los residuos forestales analizados son viables para la generación de vapor de agua, lo que permite considerarlos para accionamiento de sistemas de generación eléctrica.

***Palabras clave**: Biomasa, energía, fuente de energía alternativa, residuo forestal.*

Abstract

The analysis of forest residues from three types of trees (pine, oak and oyamel) as an alternative energy source is presented. Fragmented and shredded wood residues, typically resulting from forestry activities, are considered. The availability of these residues in Mexico, particularly in a forested region of Puebla, is analyzed. In Mexico, oak is considered the second most important timber resource after pine. The main components of biomass are analyzed through experimental tests and pressure and temperature values are determined for steam generation by biomass combustion. The analysis is performed on practically unprocessed biomass to limit the amount of energy applied in the preprocessing. The results show that the analyzed forest residues are viable for steam generation, which allows them to be considered for power generation systems.

***Key words**: Alternative energy source, biomass, energy, forest residues.*

Introducción

La aplicación de la biomasa forestal y de residuo forestal, como una fuente alterna de energía renovable ha adquirido especial interés en la actualidad [1]. Este tipo de biomasa incluye residuos forestales que se generan por las diversas actividades primarias extractivas propias de los productos forestales, y que, junto con actividades estacionales del cultivo de árboles, producen residuos forestales. También, como parte de las actividades extractivas de productos forestales se considera que en la cosecha integrada de esos recursos se obtienen principalmente dos familias de productos: (1) productos para uso estructural e industrial y (2) nuevos productos que se generan para uso energético o bio-refinamiento a partir de la recolección de biomasa de los residuos forestales del primer grupo [2]. La biomasa sólida de residuos forestales como materia prima presenta diversas configuraciones, y entre otras consiste en ramas, opas, serrín o materiales no maderables. El reciente interés en reconsiderar residuos forestales dentro de las alternativas para su uso posterior como fuente alterna de energía, se deriva principalmente de la consideración que la energía obtenida de ese tipo de biomasa es “neutra en carbono” [3]. Lo cual resulta de interés para las políticas actuales de combustibles que sean amigables con em ambiente. Al respecto se han reportado diversos estudios para la aplicación de la biomasa forestal y sus residuos como fuente de energía alterna renovable, por ejemplo, en la región que se denomina BRICS (que la componen

Brazil, Rusia, India, China y Sudáfrica) se realizan análisis para intentar establecer la relación que existe entre el uso de la energía de biomasa y el desarrollo humano [4].

Para el aspecto bioenergético de los productos forestales resulta común que en muchas situaciones solo se consideren los residuos que se producen de otras actividades, que se establecen como más rentables que los combustibles. Donde en principio, se considera que se obtiene productos más valiosos que los biocombustibles, ejemplo de estos productos son elementos maderables, la celulosa para papel, postes de madera, entre otros [5]. Sin embargo, aún si se consideran que solo los residuos forestales y/o agrícolas pueden constituirse como fuente alterna de energía, se ha establecido que ese tipo de residuos disponibles en México representaron una producción potencial de energía estimada en 87.94 millones de toneladas de materia seca por año en 2019 [6]. Donde se ha comprobado a través de la experiencia, que es claro que la fuente de biomasa más comúnmente usada en forma tradicional como fuente de energía son los residuos de madera, los cuales tiene aplicación tanto en forma directa en diferentes condiciones como para la producción de electricidad, calentamiento, transporte y cocina [7]. Es inevitable dentro del proceso de producción de madera y derivados de la misma que invariablemente resulte la generación de residuos de esos productos; donde se ha establecido que los mismos pueden dividirse principalmente en dos clases dependiendo del proceso del que se derivan: (1) de operaciones de recolección y extracción y (2) de proceso de fabricación de madera. Donde también se establece que dentro de esos procesos solo el 28 % del total de un árbol se usa como madera [8] y el resto se constituye en residuos, los cuales que pueden tener un valor agregado al aprovecharse como fuente de energía renovable. Entonces, se han planteado estudios que indican que es posible establecer de forma local el tamaño de una planta generadora de potencia eléctrica [9], esto basado en la cantidad disponible de residuos forestales para la generación de electricidad y considerando todos los factores que intervienen en el proceso de conversión para la generación de electricidad.

México tiene recurso forestal considerable, donde el aprovechamiento de la biomasa forestal para energía tiene un potencial estimado de entre 1,923 y 1,135 PJ/año [10]. Esto se hace más evidente en determinadas regiones, donde este estudio en particular considera una región en el estado de Puebla, donde predominan los bosques de coníferas, encinos. Esto además de regiones de selvas de diferentes tipos de biomasa como son matorrales, pastizales, así como, bosques de montaña y bosques templados. Para la cual la superficie con potencial para aprovechar recursos forestales, principalmente maderables, es la que está cubierta por vegetación arbórea de bosque, correspondiendo a bosque de clima templado frío, básicamente bosque de pino, pino-encino, encino, encino-otras hojosas, y bosque de oyamel. Del cual se estima que se tendría una superficie aprovechable de aproximadamente 76,114 hectáreas [11]. Junto con el residuo forestal, es necesario al considerarlo como combustible, que la combustión de este tipo de biomasa se beneficia con una adecuada preparación del combustible. Por lo cual combustibles de ese tipo por encima del 60 % de humedad pueden ser difíciles de quemar y por lo que se requiere de establecer procesos adicionales de secado [12], que pueden ser parcialmente pasivos para limitar el consumo de energía en el preproceso y que contribuyan a la mejora en el proceso de aprovechamiento del residuo forestal.

De acuerdo con lo anterior, para el presente estudio se considera analizar el potencial de aprovechamiento de la biomasa de residuos forestal de una de las regiones con recurso maderable del estado de Puebla; en específico que la conforman los municipios que presentaron más producción forestal, entre los cuales se encuentran Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán y Zacatlán. El estudio se centra en el análisis de alternativa del residuo de biomasa forestal de encino, pino y oyamel como potencial de fuente de energía a partir de recurso renovable. Ya que en México los encinos son considerados como el segundo recurso forestal maderable más importante después del género pino. Para el estudio se analizan los componentes principales que conforman la biomasa de interés a través de pruebas experimentales y se determinan los valores de presión y temperatura que se obtiene de esos residuos por fracción de masa del residuo forestal. Lo anterior se basa en que la biomasa como residuo forestal típicamente tiene dos roles como fuente de energía, a) combustibles procesados y b) combustibles no procesados; donde este estudio se enfoca en el aprovechamiento de los residuos prácticamente sin procesar, salvo el proceso de secado natural. Esto con el objeto de limitar la cantidad de energía aplicada en el preproceso del combustible y explorar las características viables de aplicación de los residuos como fuente de energía renovable alterna.

Metodología

Los materiales analizados como combustible a partir de la biomasa sólida, para el estudio proceden de residuos forestales, los cuales se recolectan después de que se han realizado las actividades primarias con ese recurso

forestal y se considera de más valía. Entonces, la biomasa de residuo forestal así obtenida se clasificó como parte de la recolección por tamaño y por el árbol del que procede. Por el tipo de árbol se consideraron tres tipos: a) encino, b) pino y c) oyamel. Por el tamaño se consideraron dos grupos principales: (1) bimasa fragmentada, que consistió en trozos de 2 cm a 8 cm de longitud y de 2 cm (aproximadamente) de espesor; y (2) biomasa en tiras que consistió en trozos de 17 cm a 25 cm de longitud y de 2 cm (aproximadamente) de espesor. Una imagen representativa (sin escala) de los tipos de biomasa considerada para el estudio se muestra en la Figura 1.

Para la clasificación e identificación de las pruebas realizadas y sus correspondientes resultados, se establece la siguiente nomenclatura que relaciona los diferentes tipos de biomasa en análisis: BFP: Biomasa fragmentada de pino, BFE: Biomasa fragmentada de encino, BFO: Biomasa fragmentada de oyamel, BTP: Biomasa en tiras de pino, BTE: Biomasa en tiras de encino, BTO: Biomasa en tiras de oyamel. Posterior a la clasificación del tipo de combustibles, la biomasa se coloca al sol para propiciar el secado y mejorar el proceso de combustión.

Dado que se considera a la biomasa como combustible, en este caso la forma de relacionar su potencial se establece a partir de la generación de vapor por unidad de biomasa. Para generar vapor y establecer las características del combustible de cada uno de los tipos de biomasa incluidos en el análisis, se realizarán una serie de 3 pruebas en cada caso, para definir la referencia del combustible. En estas pruebas de referencia para cada una de las pruebas se considera 1 kg de combustible inicialmente, con lo cual, de acuerdo los tipos de árbol y formas de la biomasa (fragmentada o en tiras) se conforma un conjunto 18 pruebas.

Posterior a las pruebas con 1 kg de biomasa para la referencia, se plantea la realización de otras series de pruebas para cantidades de 0.5 kg, 1.5 kg, 2 kg y 2.5 kg de cada forma y tipo de biomasa en análisis. En función de la prueba en algunas de estas se incluye un catalizador (50 ml de thinner) al inicio del proceso de combustión para reducir el tiempo de ignición.

Para al inicio de la combustión, se realizan dos configuraciones iniciales diferentes de la distribución de la biomasa en el hogar de combustión, esto dependiendo del tipo de biomasa que se introduce en la cámara de combustión. Para la biomasa fragmentada, por las condiciones propias de sus dimensiones se usa un acomodo piramidal inicial antes de la combustión, para la biomasa en tiras se realiza el acomodo de esta en forma vertical configurando rejillas en la cámara de combustión.

Posterior al acomodo de la biomasa, se realiza el proceso de combustión con la quema de misma. Para lo cual, en la generación de vapor se usa un tanque cerrado sobre la cámara de combustión que contiene agua al inicio del proceso, que con los gases de la combustión se convierte en vapor. Este tanque tiene capacidad para 26.5 litros y su presión interna segura de diseño se establece de 862 kPa. Para realizar las pruebas, al inicio de cada una de éstas el tanque contendrá una cantidad de 10 litros de agua. Las pruebas por realizar con esa caldera para la generación de vapor, tienen el objetivo determinar el comportamiento de la temperatura y la presión máxima alcanzada por una unidad de masa del combustible. Esto además, del tiempo que dura la combustión, tiempo de ignición y tiempo que tarda en alcanzar la temperatura máxima, para así poder establecer una relación con esos parámetros y con los diferentes tipos de biomasa analizados.



a) b)

Figura 1. Tamaños de biomasa sólida, donde: a) biomasa fragmentada y b) biomasa en tiras.

Materiales y equipo

Caldeara de pruebas (ver sección de preparación)
Válvula de alivio de la caldera a 862 kPa
Termómetro analógico de 0-300 °C
Agua a temperatura ambiente
Recipiente graduado de 2 litros
Báscula para 10 kg
Madera seca fragmentada de encino, pino y oyamel
Madera seca en tiras de encino, pino y oyamel

Preparación y desarrollo

Para los diferentes tipos de la biomasa usada (tipo de árbol y forma), ya sea fragmenta o en tiras, para la obtención de vapor se sigue prácticamente el mismo proceso, solo se modifica la configuración inicial que la biomasa adopta antes de la ignición en la cámara de combustión. El procedimiento general consiste en lo siguiente:

1.- Se inicia con el llenado del tanque cerrado con 10 litros de agua. El agua se introduce por un embudo y una vez que se tiene la cantidad se cierran las válvulas del tanque, para que posteriormente se genera la presión interna al calentar el tanque con la combustión de la biomasa. En la Figura 2 se muestra la representación del sistema de combustión y la instrumentación en el tanque.



Figura 2. Sistema de generación de vapor que incluye cámara de combustión, válvulas e instrumentos de medición para las pruebas.

2.- Se pesa la cantidad (y tipo) de biomasa a usar en la correspondiente prueba. La figura 3 muestra un esquema representativo de la cuantificación de la biomasa para la prueba, la cual tuvo un proceso pasivo de secado para retirar humedad. La diferencia entre la biomasa húmeda y la biomasa seca se presenta en la sección de resultados.



Figura 3. Cuantificación de la biomasa para las pruebas para las pruebas de combustión.

3.- Se registran las lecturas iniciales de los instrumentos de medición del recipiente cerrado antes del inicio del proceso de combustión.

4.- Para la primera serie de pruebas se introduce 1 kg de biomasa en la cámara de combustión. Para la biomasa fragmentada se forma una configuración de pirámide y se agrega 50 ml de (thinner en estas pruebas) catalizador esparciendo en toda la pirámide de combustible. Si se trata de biomasa en tira se realizan paquetes de 0.2 kg que se mantiene unidos con un alambre y se acomodan verticalmente en la cámara de combustión.

5.- Se procede al inicio del proceso de combustión de la biomasa, para posteriormente tomar lecturas a intervalos de 3 minutos de los parámetros a medir en el tanque cerrado.

Dado que la humedad, las cenizas, la materia volátil y el carbón fijo que forman parte del combustible o del proceso de combustión, pueden influir en las propiedades, se realiza un análisis de estos parámetros para una cantidad 1 kg de biomasa en cada caso. Para cuantificar y aproximar esos parámetros se realiza un análisis aproximado y un análisis definitivo como se indica a continuación.

Análisis aproximado

1.- El contenido de humada (CH) se establece como la cantidad de agua presente en la biomasa y se obtiene una vez que el material pasa por el proceso de secado como porcentaje de pérdida de peso, de acuerdo como se indica en la ec. (1).

$$CH = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad (1)$$

2.- El contenido de cenizas (CC) se establece como el residuo que permanece después del tiempo de combustión total de la biomasa. El porcentaje se calcula pesando el residuo después de la quema, y se establece de acuerdo con la ec. (2).

$$CC = \frac{m_{cen}}{m_s} * 100 \quad (2)$$

3.- El material volátil (MV) se establece calentando la biomasa en un horno cerrado durante 10 minutos y enfriando a temperatura ambiente. La pérdida de peso da como resultado el porcentaje de material volátil, como se indica por la ec. (3).

$$MV = \frac{m_s - m_{nv}}{m_s} * 100 \quad (3)$$

4.- El carbón fijo (CF) se obtienen restando el conjunto de CH, CC y MV de la masa de no volátiles, como se indica en la ec. (4).

$$CF = \frac{m_{nv} - m_{cen}}{m_s} * 100 \quad (4)$$

Donde para las ecs (1)-(4) se tiene que: m_h y m_s son las masas en g del sólido húmedo y seco, respectivamente, m_{cen} es la masa de las cenizas, m_{nv} es la masa de no volátiles obtenidos después de realizar la prueba de volátiles.

Análisis de elementos

Los valores de carbón, hidrógeno y nitrógeno en el proceso de combustión se calculan a partir de los valores aproximados previos y usando las ecuaciones (5)-(7).

$$\%C \text{ (carbón)} = 0.97CF+0.7(MV+0.1CC)-M^* (0.6-0.01CH) \quad (5)$$

$$\%H_2 \text{ (hidrogeno)} = 0.036CF+0.086(MV-0.1CC)-0.0035CH^2(1-0.02CH) \quad (6)$$

$$\%N_2 \text{ (nitrógeno)} = 2.10 - 0.020MV \quad (7)$$

Para analizar el proceso de combustión de la biomasa y su relación con los parámetros obtenidos del proceso en las pruebas realizadas con 10 litros de agua, se consideran los siguientes parámetros: tiempo de ignición de combustión (Ti) que se refiere al tiempo que en el que se introduce la flama de ignición hasta que se mantiene la llama encendida en la biomasa; temperatura máxima alcanzada en el tanque (Q) durante todo el proceso de combustión y se considera una vez que el termómetro no presenta cambios durante más de 4 minutos; aumento de la temperatura por la biomasa (ΔQ) que corresponde a la temperatura máxima menos la temperatura inicial;

Tiempo de temperatura máxima (Ttm) que es el tiempo posterior a la ignición y hasta que se alcanza la temperatura máxima; presión máxima (Pm) durante todo el proceso de combustión, tiempo de presión máxima (Tpm) que es el tiempo desde la ignición hasta que se alcanza la presión máxima; velocidad de combustión (V) que es la relación de masa consumida entre el tiempo total; tiempo de flama (Tf) que es el tiempo que se mantiene la flama encendida, tiempo de carbón encendido (Tc) que es el tiempo posterior a la flama visible pero con temperatura mayor a la del ambiente; tiempo total de combustión (Tt) que es la suma de los tiempos Tf y Tc. Estos parámetros obtenidos para las pruebas con la biomasa se presentan en la sección de resultados.

Resultados y discusión

Análisis aproximado

Como se indicó previamente, se considera la biomasa sólida de cada uno de los tipos y tamaños analizados y se establece su masa en condiciones seca y húmeda para estimar sus componentes aproximados, para el proceso de combustión. También, en el análisis aproximado propuesto en las ecs. (1)-(4), para determinar los valores CC y MV se realizaron 3 pruebas bajo las mismas condiciones para 1 kg de residuo forestal seco de biomasa sólida. Los resultados promediados de las tres pruebas para cada uno de los tipos de biomasa analizados se presentan en la Tabla 1, donde para el caso del parámetro MV se determinó a través de un horno con temperatura constante a 250 °C.

Tabla 1. Resultados de análisis aproximado.

Clasificación de biomasa	Húmeda [kg]	Seca [kg]	CH	CC	MV	CF
BFP	14.09	11.59	21.62	12.4	1.7	85.9
BFO	15.41	14.23	8.25	9.0	1.3	89.7
BFE	11.36	10.77	5.66	12.2	1.4	86.4
BTP	13.60	11.45	18.82	9.4	2.2	88.4
BTO	14.34	9.67	48.37	9.0	1.4	89.6
BTE	11.62	11.10	4.68	6.5	1.1	92.4

Análisis de elementos

A partir de los valores de la Tala 1 y de acuerdo con las ecs. (5)-(7), en la Tabla 2 se presentan los resultados para el carbono, el hidrogeno y el nitrógeno que se calculan presentes en el proceso de combustión para cada uno de los tipos de biomasa analizados.

Tabla 2. Composición calculada a partir de los datos de la tabla 1.

Clasificación de biomasa	Carbón	Hidrógeno	Nitrógeno
BFP	77.08	2.20	2.066
BFO	84.24	3.06	2.074
BFE	82.56	3.02	2.072
BTP	80.19	2.51	2.056
BTO	82.89	3.00	2.072
BTE	88.26	3.29	2.078

Parámetros de la combustión

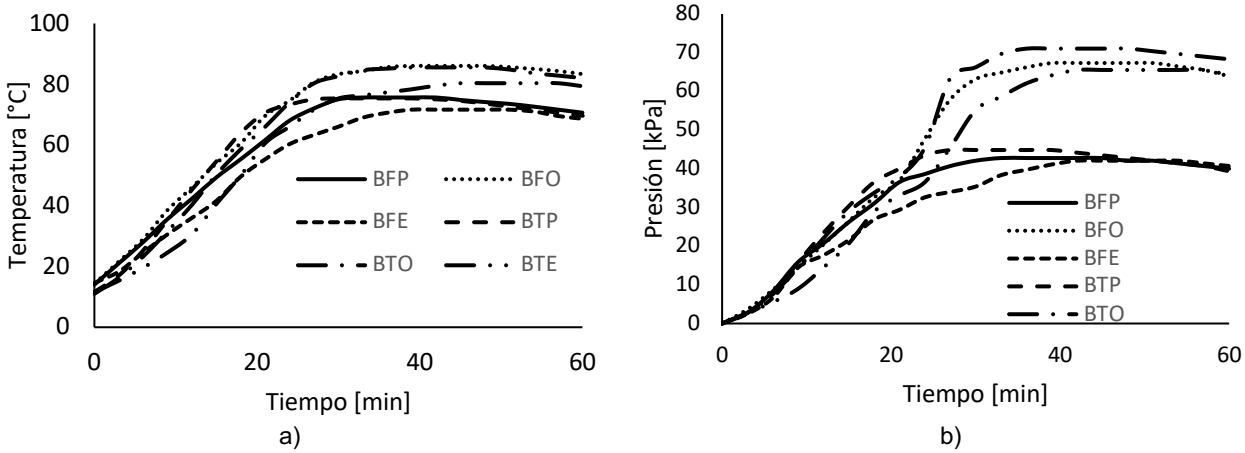
De acuerdo con el procedimiento para analizar los resultados de la combustión de los tipos de biomasa considerados con referencia a 1 kg de biomasa, y con tres repeticiones de cada una de las pruebas, en la Tabla 3 se presentan los resultados de las variables cuantificadas. De los resultados que se presentan en la Tabla 3 se obtiene que el mayor incremento de temperatura corresponde al tipo de biomasa de oyamel, tanto para su forma en tiras como en fragmentos. Lo que en consecuencia se relaciona de forma proporcional para las máximas presiones obtenidas de las pruebas. Los datos obtenidos de la Tabla 3 proporcionan la información solo la

información de los parámetros de la combustión, pero sin considerar la evolución en el tiempo de estos. Para ampliar esa información, en la Figura 4 se muestra de forma representativa la evolución en el tiempo de la presión y temperatura para los diferentes tipos de biomasa para 1 kg de combustible.

Tabla 3. Resultados de análisis de los parámetros de la combustión para 1 kg de biomasa sólida de residuo forestal.

Clasificación de biomasa	No. de prueba	Ti [s]	Q [°C]	ΔQ [°C]	Ttm [min]	Pm [kPa]	Tpm [min]	V [g/min]	Tf [min]	Tc [min]	Tt [min]
BFP	1	13	75	60	30	42.05	30	16.35	29	32	61.13
	2	14	76	64	33	44.12	33	16.09	31	31	62.14
	3	13	76	61	33	42.74	30	16.63	29	31	60.13
BFO	1	15	85	70	36	65.50	39	17.49	27	30	57.15
	2	15	87	73	36	68.94	39	16.35	29	32	61.15
	3	16	86	72	39	67.56	39	16.62	28	32	60.16
BFE	1	18	71	57	39	42.74	42	16.08	32	30	62.18
	2	18	72	57	39	41.36	42	15.82	33	30	63.18
	3	18	72	57	39	42.05	42	15.82	34	29	63.18
BTP	1	27	75	64	27	44.81	27	19.13	22	29	52.27
	2	28	76	63	27	45.50	27	19.50	21	30	51.28
	3	29	75	64	30	44.81	30	19.40	21	30	51.29
BTO	1	35	86	74	36	72.39	36	16.57	27	33	60.35
	2	35	85	75	39	71.01	39	17.43	27	30	57.35
	3	40	85	74	39	71.01	36	16.83	28	31	59.40
BTE	1	50	81	70	45	66.87	45	17.69	23	33	56.50
	2	50	80	69	45	65.50	42	17.69	24	32	56.50
	3	50	80	67	45	65.50	45	17.39	24	33	57.50

Como se aprecia de la Figura 4a), la temperatura obtenida en el recipiente cerrado no es suficiente para alcanza el punto de ebullición del agua, por lo que se realizan pruebas con diferentes cantidades de biomasa que permitan observa el comportamiento para temperaturas superiores. Por lo que de manera análoga a la Tabla 3, en la Tabla 4 se presentan los resultados promediados de tres pruebas cada uno, del proceso de combustión de los diferentes tipos de biomasa sólida con diferentes cantidades de biomasa en el proceso de combustión que van de 1 kg a 2.5 kg. A partir de los datos de la Tabla 4, se puede observar en la Figura 4 las temperaturas máximas alcanzadas por cada uno de los tipos de biomasa y para cada una de las cantidades consideradas en el análisis.



a) b)

Figura 4. Evolución de la presión y temperatura para 1 kg de biomasa, donde: a) temperatura y b) presión.

Tabla 4. Resultados de análisis aproximado.

Clasificación de biomasa	Masa [kg]	Ti [s]	Q [°C]	ΔQ [°C]	Ttm [min]	Pm [kPa]	Tpm [min]	V [g/min]	Tf [min]	Tc [min]	Tt [min]
BFP	1	13.3	75.6	61.6	33	42.7	33	16.38	29.6	31	61.03
	1.5	14	104	93	42	151.7	45	22.67	42	24	66.14
	2	15	130	116	51	303.4	54	22.18	50	40	90.15
	2.5	14	145	135	57	399.9	57	28.36	58	30	88.14
BFO	1	15.3	86	71.7	39	66.9	39	16.82	28	31	59.45
	1.5	16	116	82	39	193.1	39	22.33	37	30	67.16
	2	16	132	122	51	248.2	54	21.93	46	45	91.16
	2.5	20	136	124	57	344.7	57	23.36	57	50	107.20
BFE	1	18	71.6	57	39	42.1	42	15.82	33	30	63.18
	1.5	18	100	88	42	127.6	42	21.07	38	33	71.18
	2	20	125	110	54	262.0	57	22.1	55	35	90.20
	2.5	35	146	135	63	441.3	63	23.5	61	45	106.35
BTP	1	28	75.3	63.7	30	44.8	27	19.5	21	30	51.28
	1.5	30	110	99	42	162.0	42	24.4	36	25	61.3
	2	30	138	123	51	358.5	51	21.20	49	45	94.30
	2.5	35	148	134.5	63	468.8	66	20.94	63	56	119.35
BTO	1	36.6	85.5	74.5	39	71.0	36	16.94	27.3	31	59.03
	1.5	40	99.5	88.5	51	117.2	51	15.06	33	33	66.4
	2	45	122	111	57	244.8	60	20.52	47	50	97.45
BTE	1	50	80.3	68.7	45	65.5	42	17.39	24	33	57.50
	1.5	50	100	90	51	120.7	51	19.1	33	45	78.50
	2	50	114	104	51	192.4	54	23.12	36	50	86.50
	2.5	55	130	120	57	299.9	60	24.37	48	54	102.55

La Figura 5 muestra las temperaturas máximas alcanzadas para los diferentes tipos de la biomasa usada y para las diferentes cantidades de esta, donde se aprecia que, en todos esos los casos, con cantidades de combustible de biomasa sólida mayor a 1 kg se alcanza o se supera la temperatura de ebullición del agua, para las condiciones de prueba analizada. De donde, se corrobora que los residuos forestales de los tipos de árbol analizados en el presente estudio son viables para aplicarse en la generación de vapor que sirva como fuente alternativa de energía.

De manera representativa en la Figura 6 se presenta la evolución en el tiempo de la temperatura para la biomasa de pino en configuración tanto en tiras como fragmentada, y para las diferentes cantidades analizadas. Se incluye en las curvas de la Figura 6 la curva de la cantidad de 1 kg que se presenta en la Figura 4. Lo anterior para que sirva de referencia en la comparación con respecto al resto de cantidades de biomasa usadas. Como se observa para cantidades superiores a 1 kg se obtiene temperaturas de ebullición del agua, lo que permite considerar esa biomasa como fuente de energía alternativa.

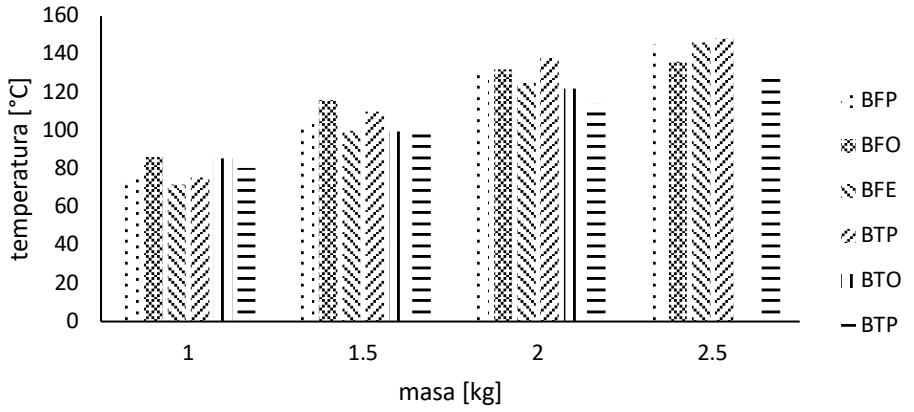


Figura 5. Temperaturas máximas alcanzadas para los diferentes tipos y cantidades de biomasa.

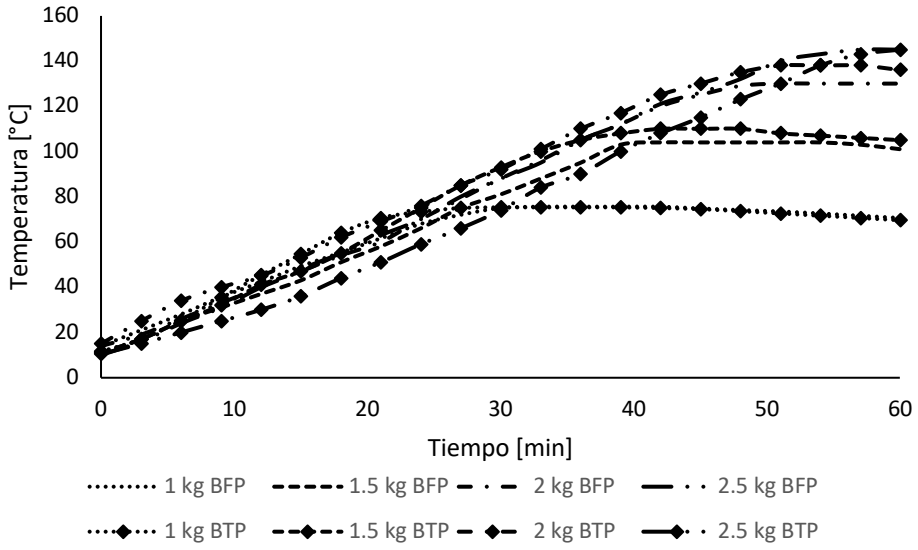


Figura 6. Evolución de la temperatura para diferentes cantidades y formas de biomasa proveniente de residuos de pino.

Por condiciones prácticas de espacio, no se incluyen los resultados de las curvas que corresponde a los tipos de árbol de encino y oyamel. Sin embargo, el comportamiento de esas curvas es análogo al presentado por el pino (Figura 6), donde además los valores máximos para esos tipos de árboles pueden revisarse en los datos de la Tabla 4, para estas pruebas. A partir de los resultados de la Tabla 4 se corrobora que los residuos forestales de pino, oyamel y encino que se ubican en una de las regiones boscosas del estado de Puebla son viables para considerarse en dentro de las fuentes potenciales alternativas como fuente de energía renovable. Además, dado que el volumen de residuos que se producen por la actividad forestal propia de la región es considerable, entonces estos residuos se proyectan para constituirse como una fuente alternativa de energía.

Trabajo a futuro

La verificación del potencial de residuos forestal como fuente alternativa de energía, junto con el interés actual de voltear hacia ese tipo de fuentes de biomasa para darles un valor agregado, y el enfoque de [9] que permite establecer plantas de generación a partir de residuos disponible, hacen necesario el avanzar en investigaciones de configuración de sistemas completos para la generación eléctrica. En ese sentido se plantean como trabajos futuros la investigación en el tipo de expansores que sean capaces de acoplarse a sistemas de bajo grado de calor, para las variantes de combustibles como los analizados en el presente estudio, para complementar los sistemas de generación.

Conclusiones

Se realizó el análisis del potencial de aplicación de residuos forestales de árbol de pino, oyamel y encino como fuentes alternativas de energía. Se revisó la disponibilidad y porcentajes de aprovechamiento de recurso maderables, enfocados en una de las regiones boscosas del estado de Puebla. Se realizó el análisis para el aprovechamiento de residuos forestales de configuraciones en tiras y fragmentada, que son casos típicos de residuos forestales. A partir de la implementación de un sistema de pruebas experimentales se cuantificó las características del uso de los residuos forestales como fuente de energía alterna. Obteniendo como conclusión que los residuos analizados pueden usarse en la generación de vapor que forme parte de un sistema de generación. Con lo que se corrobora el potencial de aplicación de esa biomasa forestal como parte de los combustibles alternativos en los procesos de producción de energía eléctrica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo otorgado para el desarrollo del presente trabajo dentro del proyecto clave 13250.21-P.

Referencias

[1] A. Favero, A.Daigneault, B. Sohngen, “Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both?”, *Science Advances 2020*, vol 6, eaay6792, pp. 1-13, 2020.

[2] R. Spinelli, R. Visser, R. Björheden, D. Röser, “Recovering Energy Biomass in Conventional Forest Operations: a Review of Integrated Harvesting Systems”, *Curr Forestry Rep* 5, 90–100 (2019). https://oi.org/10.1007/s40725-019-00089-0

[3] United States Environmental Protection Agency (USEPA), EPA’s Treatment of Biogenic Carbon Dioxide (CO2) Emissions from Stationary Sources that Use Forest Biomass for Energy Production (2018); https://epa.gov/sites/production/files/2018-04/documents/biomass_policy_statement_2018_04_23.pdf.

[4] Z. Wang, Q. Bui, B. Zhang, “The relationship between biomass energy consumption and human development: Empirical evidence from BRICS countries”, Energy, vol 194 (2020), 116906-10, 2020.

[5] M. Acuna, J. Sessions, R. Zamora,K. Boston, M. Brown, M.R. Ghaffariyan, “Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review”. *Current Forestry Reports*. doi:10.1007/s40725-019-00093-4, 2019.

[6] J. A. Honorato-Salazar, J. Sadhukhan, “Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico*”, Food and Bioproducts Processing,* Vol. 119, pp. 1-19. January 2020.

[7] E.J.Ordoñez-Frías, J.A.Azamar-Barrios, E.Mata-Zayas, O.Silván-Hernández, L.Pampillón-González, “Bioenergy potential and technical feasibility assessment of residues from oil palm processing: A case study of Jalapa, Tabasco, Mexico”, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 142, 105668-12, November 2020.

[8] N. Ayala-Mendivil, G. Sandoval, “Residuos forestales y de madera”, *Madera y Bosques*, vol. 24 (Núm. esp.), e2401877. doi: 10.21829/myb.2018.2401877, 2018.

[9] H. Nandimandalam, V. G. Gude, M. Marufuzzaman, “Environmental impact assessment of biomass supported electricity generation for sustainable rural energy systems - A case study of Grenada County, Mississippi, USA”, *Science of the Total Environment*, vol. 802, 149716-12, 2022, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149716.

[10] C.A. García, O. Masera, “ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO”, Imagia Comunicación S. de RL. de CV. ISBN: 978-607-8389-11-7.

[11] CONAFOR, “ESTUDIO DE CUENCA DE ABASTO FORESTAL REGIÓN TEZIUTLÁN, PUEBLA, MEXICO”, 2015, recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/254070/Estudio_de_cuenca_de_abasto_-_Teziutlan_Puebla.pdf.

[12] COWI (Coordinación General de Mitigación del Cambio Climático), “Catálogo de Tecnología de biomasa a Energía”, recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/434197/Cat_logo_de_Biomasa_-_Espa_ol_Modelo_05.pdf.