

EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COCHABAMBA-BOLIVIA

EVALUATION OF ENERGY GENERATION FROM URBAN SOLID WASTE GASIFICATION IN COCHABAMBA – BOLIVIA

Sebastián Valentín Paniagua-Gutiérrez, Juan René Clavijo-Grandon, Renán Orellana Lafuente, Daniel Felipe Sempértegui-Tapia

*Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)
Universidad Privada Boliviana*

dsempertegui@upb.edu

(Recibido el 30 de abril 2022, aceptado para publicación el 18 de julio 2022)

RESUMEN

El manejo de residuos sólidos es un problema crítico para muchas ciudades en Bolivia. En este sentido, este trabajo pretende evaluar la factibilidad de una planta de generación de energía a través de la gasificación de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Cochabamba. Este proceso de gasificación se modeló usando el método estequiométrico y se analizó diferentes escenarios en cuanto al contenido de humedad de los residuos, se consideró residuos sin contenido de humedad, para lo cual se requeriría un proceso de secado previo, hasta un escenario donde los residuos sólidos entran con su contenido original de humedad, el cual fue estimado en 43,5%. Considerando un flujo másico de residuos sólidos aprovechable de toda la ciudad de Cochabamba de 624,4 Ton/día, valor estimado para el año 2022, se determinó que la potencia producida estaría en un rango de 8 a 22 MW, dependiendo del grado de humedad de los residuos sólidos. Por otro lado, los proyectos de generación de energía son viables económicamente sin importar la humedad. Sin embargo, con residuos sólidos totalmente secos se obtiene un periodo de retorno de la inversión de 4 años, generando a partir de ese momento aproximadamente 20 millones de dólares de ahorro. Finalmente, también se realizó una simulación para el caso de una posible planta piloto, con un flujo de residuos reducido de 1,68 ton/día (70 kg/h). Se determinó que la potencia producida de esta planta piloto estaría en un rango de 25,56 a 70,08 kW, dependiendo el contenido de humedad de los residuos sólidos.

Palabras Clave: Generación de Energía, Cochabamba-Bolivia, Gasificación, Residuos Sólidos Urbanos.

ABSTRACT

Solid waste management is a critical problem for many cities in Bolivia. In this sense, this work aims to evaluate the feasibility of an electrical power plant that uses the gasification process of urban solid waste in the city of Cochabamba. This gasification process was modeled using the stoichiometric method and different scenarios were studied changing the humidity content, from 0% humidity (municipal solid waste totally dry) up to 43.5% humidity (the estimated amount of humidity of the municipal solid waste). Considering that Cochabamba produces approximately 624.4 ton/day of useful solid waste, it was found that it could be generated between 8 and 22 MW of power, depending of the level of humidity. On the other hand, it could be found that the project is economically viable regardless the humidity level. The best case scenario (0% humidity) provides an internal rate of return of investment of 4 years, generating from that moment 20 million dollars in savings. Finally, it was also modeled a potential pilot plant to handle a low flow rate of solid waste (70 kg/h). It was found that it could be generated between 25.56 and 70.08 kW, depending of the level of humidity.

Keywords: Energy Generation, Cochabamba-Bolivia, Gasification, Municipal Solid Waste.

1. INTRODUCCION

La gestión de residuos sólidos urbanos tiene gran importancia a nivel mundial debido a los riesgos que suponen el mal manejo de los mismos como la liberación de gases tóxicos al entorno y la generación de lixiviados[1]. En Bolivia, el 28 de octubre del 2015 se aprobó la Ley de Gestión Integral de Residuos (Ley N° 755) que tiene como objetivo la reducción de residuos sólidos, su aprovechamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura, tomando en cuenta el cuidado del planeta, la salud y vivir en un ambiente sano y equilibrado [2]. Para lograr este objetivo se plantean 10 políticas de estado, entre estas se destacan: el aprovechamiento de los residuos sólidos y el cierre de los botaderos en el país. A pesar de que la Ley N° 755 se aprobó el año 2015, para el año 2019 el departamento de Cochabamba solo 4 de los 47 municipios tienen botaderos en condiciones adecuadas y con licencia ambiental [3].

Por otro lado, el crecimiento en la generación de residuos sólidos urbanos está directamente relacionado con el crecimiento de la población, el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) proyectó para el año 2021 un incremento de

1484980 habitantes con respecto a 2012 [4], mientras que la generación de residuos sólidos urbanos se incrementó en 497509 toneladas por año el 2021 respecto al año 2012 [5], este hecho, junto con la situación de los botaderos municipales, representa una amenaza de colapso para las empresas municipales de aseo urbano, ya que el principal medio de tratamiento de los residuos sólidos que tienen es el relleno sanitario [6].

Los residuos sólidos urbanos (RSU) pueden ser tratados como recursos y no como problemas, según Coaquira y Cruz [7] el tratamiento y aprovechamiento de estos influyen de manera positiva cuidando la salud de la población y del ambiente. Como alternativas para tratar los RSU se identifican la reutilización, el compostaje, la gasificación, la pirolisis y la incineración como técnicas de aprovechamiento. Según la literatura, la gasificación y la pirolisis destacan entre todas debido a que evitan la emisión de gases tóxicos a la atmósfera, además que tienen un alto potencial energético y reducen el volumen de los residuos. Esta tecnología viene siendo utilizada alrededor del mundo, especialmente en países desarrollados, para el año 2015 la plantas procesadoras de Residuo-a-Energía (RAE) alrededor del mundo tenían una capacidad de 12912 MW y una producción total de energía eléctrica de 40131 GWh según el Consejo Mundial de Energía[8]. En América los principales referentes de esta tecnología son Brasil y Estados Unidos, por su parte Brasil el año 2007 produjo 21300 millones de litros de etanol y 730 millones de litros de biodiesel, de los cuales exportó 3532 millones de litros de etanol, mientras que Estados Unidos para 2009 tenían una potencia instalada de 1500 MW basada en el aprovechamiento de residuos sólidos [9]. En Bolivia, para el año 2021 las centrales de generación de energía eléctrica de los principales ingenios azucareros (Guabirá, Aguaí, Unagro y EASBA), inyectaron alrededor de 180,04 GWh de energía eléctrica, correspondiente al 1,87% de la energía eléctrica total inyectada ese año [10]. Este tipo de centrales basadas en biomasa son usadas principalmente en comunidades que están aisladas del Sistema Interconectado Nacional [11].

Instituciones alrededor del mundo están realizando investigaciones con el fin de determinar el potencial de transformación de residuos a energía de sus respectivas ciudades. Este es el caso del trabajo presentado por Farouk et al.[12], en el cual explica el potencial de generación en Khartoum, territorio perteneciente a Sudan, mencionando que, dicha población de diez millones de habitantes produce diariamente alrededor de 5000 toneladas de residuos sólidos, por lo que propone la utilización de cinco plantas con una capacidad de 300000 ton/año para convertir todo los residuos generados en energía, concluyendo que la potencia instalada que podría llegar a tener es de 260 MW. Adicionalmente, los autores hacen hincapié en el costo de estas instalaciones, mencionando que generalmente son más costosas que las plantas de generación standard y se estima su costo entre 5-8 millones de dólares por MW de potencia. Añadiendo además de que evitaría la emisión de 650000 toneladas de CO₂ al año.

Otro ejemplo de esto, es el análisis económico de una planta de gasificación por arco de plasma en la ciudad de Marion-Iowa realizado por Clark y Rogoff [13], en el cual estiman que una planta de generación de residuos a energía eléctrica con capacidad de generar 533 kWh/ton tiene un costo de nueve millones dólares, con una ganancia de alrededor \$37/ton de residuos procesados. En Colombia Montiel-Bohórquez et al. [14] hicieron un estudio similar para la ciudad de Medellín con el objetivo de validar si los incentivos de su país para este tipo de energías eran efectivos. Medellín produce alrededor de 1980 ton/día de RSU, de las cuales tomaron en cuenta solo 900 ton/día. Los resultados que obtuvieron son 56 MW de potencia eléctrica, a un costo de 7,56 ¢US\$/kWh con lo cual probaron la efectividad de los incentivos, ya que el costo que calcularon fue ligeramente mayor al promedio de Colombia y con una inversión inicial de 268,7 millones US\$.

Por otro lado, Khan *et al.* [15], lista los posibles problemas que tienen los países del sur de Asia y África Subsahariana para implementar este tipo de tecnologías y que podrían ser aplicables al contexto boliviano:

- Falta de programas bien organizados de manejo de residuos sólidos, que permitan la separación del mismo.
- Métodos efectivos de recojo de residuos.
- Experiencias previas negativas.
- Ausencia de tecnología apropiada, y de mano de obra capacitada.
- Apoyo financiero insuficiente y falta de coordinación entre sectores del gobierno.
- Ausencia de políticas y regulaciones locales para este tipo de generación de energía.

Considerando los datos expuestos, una posible solución al actual problema de la basura es la creación una planta RAE bajo el proceso de gasificación. Este proceso transforma la materia prima (RSU) en un gas (gas de síntesis o *syngas*) con un poder calorífico moderado, esto debido a la aplicación de calor, un agente gasificante (aire, hidrogeno, vapor de agua u oxígeno puro) y controlando los niveles de aire en el proceso [16]. Luego, el gas producido puede ser usado una maquina térmica como un motor de combustión interna o turbinas de gas para la generación de energía mecánica y de esta forma energía eléctrica [17].

En este sentido, este trabajo evalúa la capacidad de generación de energía a partir de los RSU en la ciudad de Cochabamba, mediante una planta RAE que funcionaria con el proceso de gasificación. Se realizará el estudio en cuatro escenarios posibles (contenido inicial de la humedad de los RSU) que tienen que ver con la eficiencia de la producción

del *syngas*, para de esta forma realizar un análisis financiero de la planta. Para la simulación del proceso de gasificación se empleó un modelo desarrollado por Melgar *et al.* [18], que estima la producción de *syngas* en base a la composición de los RSU y su humedad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Gasificación

La gasificación es un proceso que implica la combustión incompleta de biomasa a temperaturas entre 700 °C y 1000 °C, lo cual se logra controlando el agente gasificante. Este agente es el elemento que reacciona con la biomasa en ciertos subprocesos, dicho proceso tiene como objetivo conseguir gases combustibles compuestos por monóxido de carbono, hidrógeno, metano y alquitrán. Estos gases combustibles son fáciles de transportar a cortas distancias y puede usarse para accionar motores de combustión interna, sustituir el petróleo en calderas u hornos para aplicaciones de calor directo o producción de metanol; o para introducirlo a una turbina [19], [20]. La Figura 1 presenta todos los subprocesos que están involucrados en el proceso de gasificación.

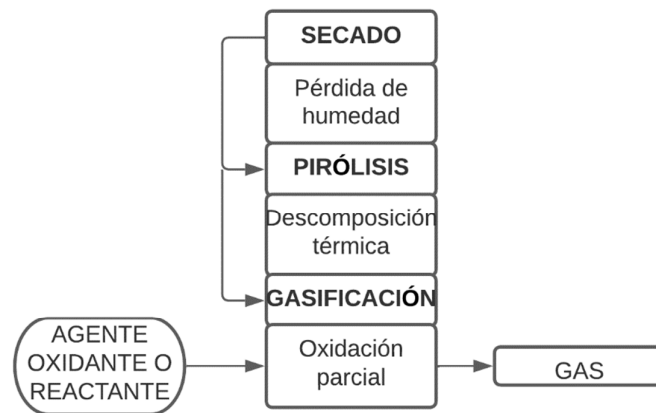


Figura 1: Diagrama de un proceso de gasificación, adaptado de Navarro [19].

La primera etapa es la de secado cuya temperatura de trabajo es de alrededor de 300 °C, con el propósito de disminuir el contenido de humedad del RSU. La etapa de pirólisis sucede a una temperatura de entre 300 °C y 500°C, en esta etapa el RSU se combustiona con un porcentaje nulo de oxígeno/agente gasificante para aumentar el poder calorífico de los sólidos y aparezcan algunos componentes volátiles, a la salida de esta etapa el RSU ya ha perdido cerca del 70% de su peso. Por último, en la etapa de gasificación ocurren reacciones de oxidación, reducción en presencia del agente gasificante, donde el sólido de entrada termina el proceso de combustión dando como resultado por una parte las cenizas y por otro el producto de interés el *syngas*, además de aportar la energía necesaria para este proceso endotérmico [19], [20], [21].

2.2 Parámetros importantes a tener en cuenta en un gasificador.

El agente gasificante es de especial interés en el funcionamiento de un gasificador. Este repercute directamente en el poder calorífico del RSU y por ende la calidad del *syngas* de salida. Como se mencionó anteriormente los agentes que se pueden usar son:

- **Aire:** Generalmente produce *syngas* de baja calidad con un contenido de alrededor del 50% en nitrógeno y con un poder calorífico aproximado de 3 a 6 MJ/Nm³. La mayor ventaja del uso de este agente es el costo cero que representa su uso, ya que solo es necesario un compresor para que ingrese al reactor del gasificador.
- **Oxígeno:** Requiere un control más estricto de las reacciones que ocurren durante la gasificación, de tal manera que el sólido carbonoso no se agote antes de completar la reacción, este agente produce *syngas* de aproximadamente 10 a 15 MJ/Nm³. El principal problema del uso de oxígeno son los costos, ya que además del compresor se añaden los costos de la compra de oxígeno.
- **Hidrógeno:** Es la mejor opción si lo que se quiere es obtener un *syngas* de alta calidad con poder calorífico de hasta 40 MJ/Nm³, pero teniendo en cuenta que es el mejor combustible del mundo, no resulta viable usarlo como agente gasificante ya que significa bajar el rendimiento del hidrógeno [19].

Según Navarro [19], los rangos de temperatura que se presentan durante la gasificación deben ser invariable, ya que de ocurrir una gran variación en la misma las reacciones termo-químicas que ocurren pueden no completarse. La calidad del *syngas* también se ve afectado por el tamaño de la materia prima; excesivo tamaño da lugar a una menor reactividad, una biomasa demasiado fina puede ocasionar problemas de circulación en los depósitos del gasificador. Es por eso que el uso de pellets es favorable para el proceso ya que al paletizar la biomasa, se hace más homogénea y de mayor densidad, lo que representa mucha más energía por volumen ocupado [20], [22]. La Tabla 1 presenta los parámetros fisicoquímicos para pellets de biomasa mixtas para dos tipos de pellets comercializables (AGRO+ y AGRO) según normas francesas como referencia.

TABLA 1 - PARÁMETRO FISICOQUÍMICOS PARA PELLETS DE BIOMASAS PROPORCIONADA POR FORERO *et al.* [22]

Parámetro	Unidades	AGRO+	AGRO
Diámetro	mm	6 – 8	6 – 16
Longitud	mm	10 – 30	10 – 30
Contenido de Humedad	% wt (b,h)	<11	<15
PCI	MJ/kg	>15,5	>14,7
Densidad de partícula	Kg/m ³	>650	>650
Durabilidad Mecánica	%	>95	>92
Cantidad de Finos	%	<2	<3
Contenido de Ceniza	% wt (b,s)	<5	<7
Cl	% wt (b,s)	<0,2	<0,3
N	% wt (b,s)	<1,5	<2
S	% wt (b,s)	<0,2	<0,2
Temperatura de Ceniza	°C	1000	800
As	mg/kg		<1
Cu	mg/kg		<40
Cr	mg/kg		<10
Cd	mg/kg		<0,5
Hg	mg/kg		<0,1
Ni	mg/kg		<15
Pb	mg/kg		<10
Zn	mg/kg		<80

Por otro lado, es importante mencionar que la cantidad y composición de la ceniza es de vital importancia para garantizar el tiempo de vida del gasificador, las cenizas principalmente están compuestas por: Si, Ca, K, Mg y P, la presencia de Ca y Mg aumenta el punto de fusión de la ceniza, pero ocurre todo lo contrario con la presencia K y Na; por otro lado, el Si con K puede formar silicatos de bajo punto de fusión. Todo lo anteriormente mencionado influye directamente en la eficiencia y vida del gasificador, uno de los problemas que puede provocar el bajo punto de fusión de la ceniza es la escorificación de la parte más baja del gasificador o taponamiento de ciertas tuberías [20].

2.3 Tipos de gasificadores

Los tipos de gasificadores que se verificaron en la literatura son: de lecho recurrente, de lecho fluidizado y de lecho fijo. A continuación, se describe cada uno haciendo especial énfasis en los de lecho fijo, ya que es en el que se basa este estudio.

- **De lecho recurrente:** El residuo de biomasa es conducido por las corrientes de flujo del agente oxidante estos dos componentes entran al reactor en la misma dirección y la gasificación se genera de manera instantánea [19]. En la tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas de este tipo de gasificador.
- **De lecho fluidizado:** Su principal característica es que el agente gasificante entra por la parte inferior del gasificador, con el fin de darle propiedades de fluido a la biomasa dentro del gasificador.

TABLA 2 - PARÁMETRO FISCOQUÍMICOS PARA PELLETS DE BIOMASAS PROPORCIONADA POR [22]

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> No produce alquitranes Elevada eficiencia Adecuado para plantas a gran escala como centrales de ciclo combinado. Bajo tiempo de residencia del combustible en el equipo entre 1s a 5 s 	<ul style="list-style-type: none"> La alimentación de la biomasa se da de manera pulverizada, menores de 100µm La temperatura en la que se entrega el <i>syngas</i> es muy alta

TABLA 3 - VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Alta capacidad volumétrica Tiempo de residencia del combustible medio 10 s a 100 s. Opera en alimentación continua o por tandas Se logra bajos contenidos de alquitrán debido a la uniformidad de la partícula y a la distribución uniforme de temperatura en la partícula. Se presta bien para biomazas con alto contenido de ceniza, pero con el punto de fusión bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> Muchos tipos de biomasa no se pueden fluidizar ya que el lecho tiende a formar canales por donde el aire pasa mientras los sólidos permanecen estáticos. Requiere carbón o biomasa muy reactivos. Alto grado de complejidad en el diseño de sistemas sopladores y en tornillo sin fines de alimentación de biomasa. La biomasa debe tener dimensiones uniformes, iguales o menores de 6 mm.

- **De lecho fijo:** Los reactores de lecho fijo pueden ser alimentados de manera continua o por lotes de biomasa residual (lecho fijo). Se caracterizan en formar una cámara de residuo sólido, donde avanza hacia la parte inferior a medida que ocurren las reacciones [19]. Entre los gasificadores de lecho fijo se puede encontrar:
 - **Downdraft o de flujo paralelo:** Se alimenta la biomasa por arriba y el *syngas* sale por abajo y se introduce el agente gasificante por la parte del reactor en donde se da la reacción de oxidación [21].

TABLA 4 - VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Tiende a formar contenidos bajos de ceniza en el combustible. Fácil de fabricar, barato. 	<ul style="list-style-type: none"> Baja eficiencia térmica. Se requiere que la humedad de la biomasa sea baja (menor del 30%).

- **Crossdraft o de flujo cruzado:** El residuo de biomasa ingresa al reactor por la parte superior se realiza el flujo cruzado cuando el agente oxidante entra directamente en la zona de gasificación por la misma zona se entrega el *syngas* [19].

TABLA 5 - VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS GASIFICADORES CROSSDRAFT

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Contenido de alquitrán en el gas medio. Es bueno en la capacidad de reacción con grandes cargas de agente oxidante. Las cenizas y la biomasa sirven con aisladores para las paredes del equipo permitiendo variedades de materiales. Pueden funcionar en muy pequeña escala, pudiendo resultar económicamente viables, en ciertas condiciones, instalaciones inferiores a 10 kW. La puesta en marcha es más rápida con respectó al reactor de flujo paralelo y contracorriente. 	<ul style="list-style-type: none"> Tiende a formar contenidos altos de ceniza. Caída de presión alta. Baja eficiencia térmica. Capacidad mínima de transformación del alquitrán y la necesidad consiguiente de emplear biomasa de alta calidad (bajo contenido de productos volátiles). Debido a las elevadas temperaturas se requiere que los contenidos de ceniza en la biomasa sean bajos con el objetivo de evitar taponamientos.

- Updraft o de flujo paralelo:** La biomasa entra por la parte superior, el agente gasificante por la parte inferior y el *syngas* sale por la parte superior. Este gasificador se divide en la zona de secado, zona de destilación, zona de reducción, zona del hogar y la zona de las cenizas. La zona de destilación corresponde a la de pirolisis, mientras que, la zona de reducción y del hogar corresponde a la de gasificación, como se mencionó anteriormente de la pirolisis se obtiene sólidos carbonosos, los cuales se ven depositados en una parrilla al fondo del gasificador, en donde se producen reacciones de oxidación y reducción hasta que se convierten en ceniza, además estos sólidos carbonosos son los principales encargado de brindar el calor necesario a todo el gasificador para que se produzcan todas las reacción implícitas en el proceso [20], [21]. La Figura 2 ilustra una representación gráfica de este tipo de gasificador updraft extraídas de [19], [21].

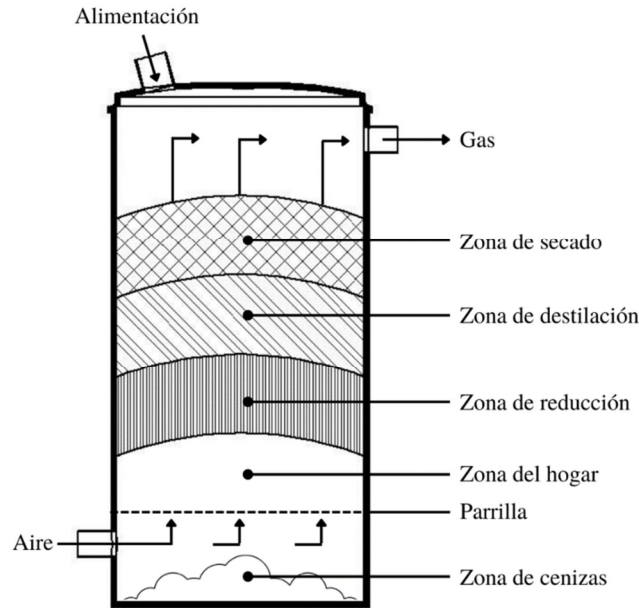


Figura 2: Representaciones de un gasificador updraft.

La Tabla 6 muestra un resumen de las ventajas y desventajas en general de los gasificadores *updraft*.

TABLA 6 - VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN GASIFICADOR UPDRAFT

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Puede funcionar con biomasa que tengan porcentajes de alta humedad. • Casi nada de la energía calórica se pierde ya que una parte de calor ayuda a secar la biomasa húmeda entrante. • Tiene una pequeña caída de presión. • Buena eficiencia térmica. • Tiende a formar contenidos bajos de escoria. • Las biomosas con bajo contenido de carbón, cenizo y volátil se manejan bien en el reactor ascendente. • Fabricación simple, baratos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para las biomosas que tienen altos volátiles, este equipo es poco prácticos. • En la puesta en marcha se gasta un tiempo largo debido a la gran masa térmica en cuestión. • Es pobre en la capacidad de reacción con grandes cargas de agente oxidante. • El <i>syngas</i> no es aconsejable para el uso de motores de combustión debido al porcentaje de alquitranes (5% a 20%). • Existe difusión dentro del sistema que lleva a una gran cantidad de producción de alquitrán. • Riesgo de explosión a causa de la alta cantidad de alquitranes presentes. • Requiere un filtro adicional para los alquitranes.

3. METODOLOGÍA Y PARÁMETROS DE ENTRADA

En esta sección se describe como se obtiene la composición química de los RSU generados en la ciudad de Cochabamba y la tasa de producción diaria de los mismos. También, se describe el modelo utilizado para simular el

proceso de gasificación y el plan de simulación en el cual se hace variar el contenido de humedad debido a su relación directa con la conversión de RSU a gas y la eficiencia del proceso[23]; en base a estos datos se calcula la generación de energía eléctrica a partir de RSU en la provincia de Cochabamba y la factibilidad de una planta de tratamiento.

3.1 Composición química de los residuos sólidos urbanos en Cochabamba

Para determinar la cantidad de gases producidos en el proceso de gasificación es necesario conocer la composición química promedio de los RSU. Estos datos se presentan en la TABLA 7, la mayor parte de los residuos corresponden a materia orgánica (45,25%), luego, se encuentran los plásticos (17,29%), seguidos por los residuos de jardín (10,02%), el papel y cartón (7,73%) y los textiles (2,64%) de acuerdo a datos proporcionados por [20]. Para una planta Residuo-a-Energía (RAE) no se toma en cuenta el vidrio y los metales (2,27%) debido a que se tratan de materiales inertes que no aportan en el proceso de gasificación[20], además no se toman en cuenta los residuos peligrosos, residuos sanitarios y otros (14,8%) debido a que no se conoce exactamente su composición por lo tanto pueden ser materiales de alto riesgo. Los residuos sólidos aprovechables para RAE corresponden a un 82,93% de los generados en total, luego, también se muestra la composición adecuada a RAE tomando en cuenta solo los residuos a usar.

TABLA 7 - COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN LA CIUDAD DE COCHABAMBA [21]

Componente	Composición Física del RSU (%)	Composición Adecuada para RAE
Materia Orgánica	45,25	54,56
Residuos de Jardín	10,02	12,08
Papel y Cartón	7,73	9,32
Textiles	2,64	3,19
Residuos sanitarios	9,4	-
Plásticos	17,29	20,85
Vidrio	1,17	-
Metales	1,1	-
Residuos peligrosos	0,4	-
Otros	5	-
Total	100	100

En la Tabla 8 se muestra la humedad de cada componente de RSU y los porcentajes típicos de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza. De esta forma se puede calcular la composición química de cada componente y así encontrar una fórmula de sustitución para los RSU producidos.

TABLA 8 - COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS [26]

Componente	Humedad (%)	Análisis Último del Componente (% peso, base seca)				
		C	H	O	N	S
Materia Orgánica	65	48	6,4	37,6	2,6	0,4
Residuos de jardín	55	47,8	6	38	3,4	0,3
Papel y Cartón	7	43,5	6	44	0,3	0,2
Textiles	10	55	6,6	31,2	4,6	0,15
Plásticos	2	60	7,2	22,8	-	-

El poder calorífico inferior (PCI) de los RSU se estimará mediante la ecuación (1) presentada por Mahinpev et al. [27] la cual relaciona el poder calorífico superior (PCS) con la composición porcentual de los residuos con un coeficiente de determinación de 93,8%, para hallar el PCI se restó el calor de vaporización del agua del PCS.

$$PCS = -1.46 + 0.361 C + 1.05 H - 0.16 N + 1.24 S - 0.0658 O \quad (1)$$

3.2 Tasa de generación de residuos sólidos urbanos

Para determinar la tasa diaria de generación de RSU en la ciudad de Cochabamba, en base a información del Instituto Nacional de Estadística (INE) que cuenta con las toneladas generadas anualmente desde el año 2005 hasta el 2021, estas cantidades se muestran en la Figura 3.

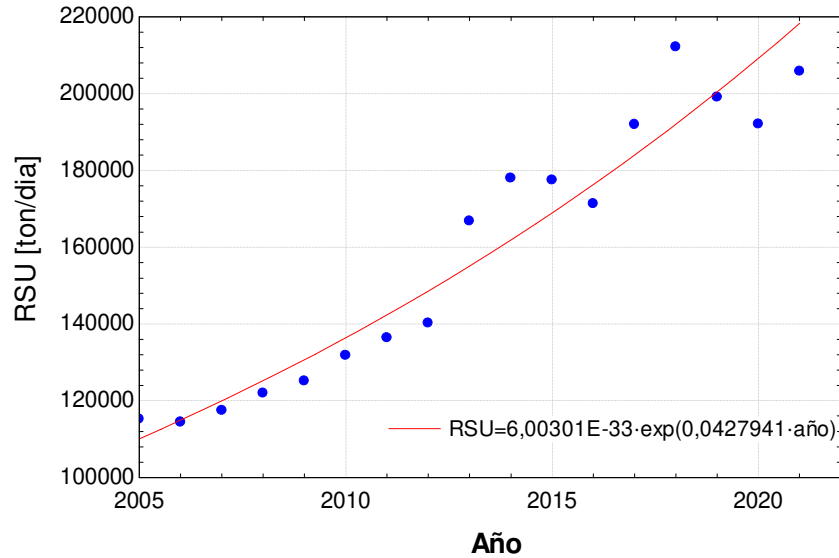
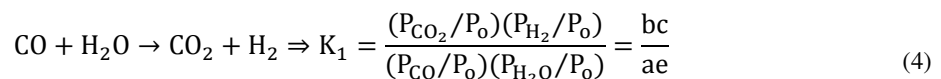
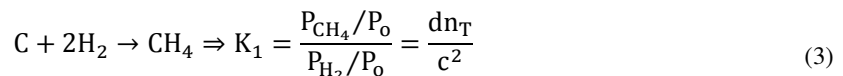
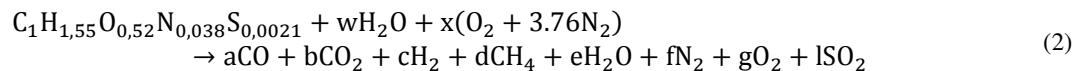


Figura 3: Generación de residuos sólidos en la ciudad de Cochabamba.

A través de una regresión exponencial se obtuvo el coeficiente de determinación de 94%, estimando que la producción diaria para el año 2022 que sería de 624,4 [Ton/día].

3.3 Modelo termo-químico

Para realizar la simulación del proceso de gasificación de los RSU se tomó en cuenta las ecuaciones químicas y térmicas presentadas por Melgar *et al.* [18] que estiman la composición de gases de salida del proceso. El modelo determina estas cantidades en base a la composición elemental de los RSU, basándose en el equilibrio químico de los compuestos presentes en la reacción. En la ecuación (2) se muestra la reacción química global en el proceso de gasificación, para poder igualar esta ecuación se tiene como datos de entrada la composición química de los RSU, la fracción molar de agua en la biomasa (w), en base a la humedad (h), ecuación (6) y la cantidad de aire usada en el proceso (x). Para terminar de resolver la igualación son necesarias dos ecuaciones más que son las ecuaciones (3) y (4), la primera representa la zona de reducción en la cual el hidrogeno se reduce a metano por el carbón y la segunda corresponde a la reacción de cambio de agua y gas que describe el equilibrio entre monóxido de carbono e hidrogeno en presencia de agua. En base a estas dos ecuaciones se determina las constantes de equilibrio que ambas (K_1 y K_2) se determinan por la energía libre de Gibbs que se describe en la ecuación (5).



$$K_p = e^{-\Delta G_t^0 / R_u T} \quad (5)$$

$$w = \frac{PM_{RSU} h}{PM_{H_2O}(1-h)} \quad (6)$$

Una vez obtenidos los productos, se procede a calcular el flujo másico resultante con la ecuación (7), el cual depende del flujo másico de entrada, su porcentaje de humedad, el peso molecular de los RSU, del monóxido de carbono, el hidrógeno molecular y el metano. Por otro lado, para el cálculo de la potencia eléctrica de salida se usa el flujo másico calculado, la eficiencia global y el poder calorífico inferior del *syngas* en la ecuación (8).

$$\dot{m}_{syngas} = \frac{\dot{m}_{RSU} (1-h)}{PM_{RSU}(aPM_{CO} + cPM_{H_2} + dPM_{CH_4})} \quad (7)$$

$$P_{eléctrica\ neta} = \dot{m}_{syngas} \eta_{global} PCI_{syngas} \quad (8)$$

La simulación consideró cuatro posibles escenarios donde se variará la humedad desde 0% a la humedad original de los RSU, la cual será estimada. Para cada caso el parámetro que varía es la humedad de los RSU debido a que a mayor contenido de humedad se reducen los gases producidos, pero para secar los residuos se requiere de energía, por lo tanto, se evalúa la producción de energía en estos cuatro escenarios.

El modelo se simuló con el software Engineering Equation Solver (EES), en el cual primero se resolvió la ecuación (2), para poder obtener los productos de la reacción anteriormente explicada, seguidamente se procedió a calcular el flujo másico de *syngas* con la ecuación (7), luego se procede a calcular la potencia eléctrica producida por el *syngas* con la ecuación (8).

4. ANALISIS Y RESULTADOS

Con los parámetros descritos en la Sección 3, se realizó el análisis de los RSU generados en la ciudad de Cochabamba, en base a los datos reportados por Toledo y Lujan [25] y Chandrappa y Das [26]. La Tabla 9 muestra la composición elemental del *syngas* proveniente de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Cochabamba, así como su poder calorífico inferior y el porcentaje de humedad presente sin tratamiento alguno.

TABLA 9 - COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE COCHABAMBA PARA RESIDUO-A-ENERGÍA

Análisis Último en Base Seca	Masa (%)
Carbono	50,28
Hidrogeno	6,49
Oxigeno	34,95
Nitrógeno	2,26
Azufre	0,28
Formula de sustitución	$C_1H_{1,5483}O_{0,5214}N_{0,03845}S_{0,002073}$
Relación RSU/aire estequiométrico	0,1455
PCI _{seco} [KJ/Kg]	20560,8
Humedad	43,49%

Una vez obtenido el *syngas*, se utilizará un generador eléctrico Diesel para determinar la potencia generada para cada escenario considerando una eficiencia promedio de las RAE de 24% [8]. En base a las potencias generadas en cada escenario y al precio de una planta procesadora [28] se calcularon los ingresos anuales y el periodo de retorno de la inversión [29], tomando en cuenta el precio de la energía eléctrica regulado por el Comité Nacional de Despacho de Carga [30]. Es necesario aclarar que no se trata de un ingreso sino de un ahorro debido a que se prevé que la planta generara energía para la propia alcaldía y por ende, habrá un ahorro en el pago mensual a la empresa distribuidora de energía (ELFEC); esta diferenciación se hace debido a que cuando se vende la energía eléctrica como una empresa

generadora el precio es bajo (entre 0,1 y 0,2 Bs/kWh) [31], en cambio, cuando se paga la energía a ELFEC el precio es alto (entre 0,8 a 1 Bs/kWh) [30], por lo tanto, para este estudio se consideró un valor promedio de 0,9 Bs/kWh.

La potencia generada neta, el ingreso anual y el periodo de retorno para una planta que pueda tratar todos los residuos de Cochabamba se pueden apreciar en la TABLA 10. Se notó que a pesar de que se requiera cierta potencia para secar los residuos es conveniente hacerlo debido a que la potencia generada aumenta más de lo que se gasta en el secado. Luego, se puede percibir que en todos los casos la inversión se recupera y en el mejor de los escenarios después de 4 años esta planta supondría un ahorro de 20 millones de dólares anualmente.

TABLA 10 - RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE UNA PLANTA PROCESADORA DE RSU PARA LA CIUDAD DE COCHABAMBA

Caso de Estudio	Humedad (%)	Potencia neta (MW)	Ahorro Anual (Millones \$USD)	Periodo de Retorno (años)
Escenario #1	0	22,21	20,87	4
Escenario #2	15	18,93	17,57	5
Escenario #3	30	12,63	11,27	7
Escenario #4	43.49	80,80	6,65	11

Para validar el modelo termoquímico usado para los resultado de la Tabla 11 se tomó referencia de los resultados experimentales obtenidos en un estudio realizado el año 2011 por Vidaurre et al. [28], el cual estudiaba la factibilidad de una planta de gasificación en el departamento de Pando. Para la simulación se usó los mismos parámetros de entrada usados en dicho estudio que son un flujo másico de 70 (Kg/h) y una humedad de los residuos del 0%, la comparación de los resultados obtenidos en la simulación y del estudio se muestran en la Tabla 11.

TABLA 11 - VALIDACIÓN DEL MODELO REALIZADO CON UNA HUMEDAD DEL 0%

Origen	Flujo Másico (Kg/h)	Potencia de Salida (KW)
Estudio [28]	70	70
Simulación	70	70,08

La comparación se realizó entre las potencias de salida debido a que estas dependen directamente de la producción del *syngas* durante el proceso de gasificación. Se encontró que respecto a los resultados experimentales el modelo tiene un error del 0,11%, lo cual nos indica que el modelo desarrollado es válido.

Considerando los resultados alentadores obtenidos en la Tabla 10 así como la experiencia en el departamento de Pando, los autores sugieren que se debería comenzar con una planta piloto de precisamente un flujo de RSU de 70 kg/h. La Tabla 12 muestra estos resultados de la planta piloto para los 4 escenarios de humedad en los RSU.

TABLA 12 - RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PROCESADORA DE RSU

Caso de Estudio	Humedad (%)	Potencia neta (KW)	Ahorro Anual (\$USD)	Periodo de Retorno (años)
Escenario #1	0	70,08	439 257	4
Escenario #2	15	54,5	330 076	5
Escenario #3	30	36,8	206 061	9
Escenario #4	43.49	25,56	127 300	14

Se puede observar que la planta piloto es viable con un periodo de retorno de la inversión de 4 años, la potencia neta en este caso no es muy alta debido a que el flujo másico es inferior, lo que también hace que el ahorro sea menor. Pero cabe resaltar que esta planta tendría mucha importancia para futuros trabajos porque si llegase a construirse permitiría recabar información actual de los residuos, así como mejorar los modelos de simulación y especialmente tener una valoración de los aspectos económicos.

5. CONCLUSIONES

Se hizo el estudio teórico para la generación de energía a través de la gasificación de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Cochabamba-Bolivia. A partir de este trabajo se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a la literatura, el gasificador de lecho fijo tipo *updraft*, es el indicado para la construcción de una planta piloto en Cochabamba, debido a su bajo costo y simplicidad de construcción.
- Se encontró que el flujo diario de RSU aprovechable en Cochabamba es de 624,4 ton, su humedad original sería de 43.5% y su poder calorífico inferior en base seca de 20560,8 [kJ/kg]
- Se logró simular el proceso de gasificación a través de un modelo estequiométrico el cual fue validado con los datos experimentales de una planta piloto en el departamento de Pando.
- Con las 624,4 ton/día de RSU aprovechables, se verificó mediante la simulación que en Cochabamba podrían generarse entre 8 y 22 MW de potencia, dependiendo el contenido de humedad inicial de los mismos.
- Contrastando la influencia de la humedad en los RSU, se puede notar que en el mejor de los escenarios el periodo de retorno de la inversión es de 4 años comparándolo con el peor escenario en el que no se seca los residuos con un periodo de 11 años llegando a obtener una diferencia de siete años entre el mejor y peor escenario; por lo tanto, se concluye que el secado es un paso importante dentro del proceso de gasificación de residuos sólidos.
- Se recomienda inicialmente la implementación de una planta piloto para obtener más resultados experimentales y sobre todo valorar más a fondo los aspectos económicos.

Por último, es importante mencionar que el modelo es capaz de realizar el análisis para otros departamentos o municipios si se obtiene la composición elemental de los residuos sólidos, su humedad y la relación aire combustible.

REFERENCIAS

- [1] L. U. O. Sotomayor, «Efectos y riesgos ambientales generados por el botadero de residuos sólidos del distrito Paucarpata, Arequipa 2018», Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2018.
- [2] Asamblea Legislativa Plurinacional, *Ley De Gestión Integral De Residuos*. 2015, p. 21.
- [3] O. Bolivia, «43 de los 47 botaderos operan en malas condiciones y sin licencia», *Opinión Bolivia*, 2019. <https://www.opinion.com.bo/articulo/cochabamba/43-47-botaderos-operan-malas-condiciones-licencia/20190612002400652001.html>
- [4] I. N. de Estadística y Ministerio de Planificación del Desarrollo, «Bolivia: Población estimada y proyectada por departamento, según años calendario, 2012-2025». 2020.
- [5] I. N. de Estadística y Ministerio de Planificación del Desarrollo, «Bolivia: Recolección de residuos sólidos por ciudades capitales, según año y mes, 2005 - 2021». 2021.
- [6] V. Delfin Espinoza, «Diseño y construcción de un prototipo para convertir residuos sólidos urbanos en gas de síntesis», UMSA, La Paz, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/26056>
- [7] H. T. Coaquira Cabrera y P. N. Cruz Ruelas, «Revisión sistemática: Gestión de los residuos sólidos urbanos y la contaminación en la salud comunitaria, 2021», *Repos. Inst. - UCV*, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/73441>
- [8] World Energy Council, «World Energy Resources: Waste to Energy 2016». 2016.
- [9] C. Á. Maciel, «Biocombustibles: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional», *Econ. Inf.*, n.º 359, p. 27, 2009.
- [10] Comité nacional de despacho de carga, «Inyecciones y Retiros de Energía año 2021». 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cndc.bo/media/archivos/estadistica_anual/inretkw_2021.zip
- [11] J. Franco Oyarbide, «Bioenergía en Bolivia». Oficina Económica y Comercial de España en La Paz, 24 de septiembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/el-mercado/estudios-informes/DOC2020861926.html?idPais=BO>
- [12] H. Farouk, A. Lang, F. Tahir, y S. G. Al-Ghamdi, «Municipal solid waste: A potential source of clean energy for Khartoum State in Sudan», *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 342-349, nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.05.145.
- [13] B. J. Clark y M. J. Rogoff, «Economic Feasibility of a Plasma Arc Gasification Plant, City of Marion, Iowa», en *18th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, Orlando, Florida, USA, ene. 2010, pp. 121-130. doi: 10.1115/NAWTEC18-3502.

- [14] N. D. Montiel-Bohórquez, J. D. Saldarriaga-Loaiza, y J. F. Pérez, «Analysis of investment incentives for power generation based on an integrated plasma gasification combined cycle power plant using municipal solid waste», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 30, p. 101748, feb. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2021.101748.
- [15] I. Khan, S. Chowdhury, y K. Techato, «Waste to Energy in Developing Countries—A Rapid Review: Opportunities, Challenges, and Policies in Selected Countries of Sub-Saharan Africa and South Asia towards Sustainability», *Sustainability*, vol. 14, n.º 7, p. 3740, mar. 2022, doi: 10.3390/su14073740.
- [16] CEUPE, «¿Qué es la gasificación?», *Ceupe*, 2019. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-gasificacion.html>
- [17] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, Octava ed. 2015.
- [18] A. Melgar, J. F. Pérez, H. Laget, y A. Horillo, «Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process», *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, n.º 1, pp. 59-67, ene. 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2006.05.004.
- [19] W. D. N. Abril, «Diseño de un gasificador dual para biomasa residual agropecuaria a nivel laboratorio», Fundación Universidad de América, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/103>.
- [20] C. D. M. Gómez, «La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: Optimización Energética y Exergética», Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/cittes?codigo=95418>
- [21] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *El gas de madera como combustible para motores*. Roma. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/T0512S/t0512s00.htm#Contents>
- [22] C. A. Forero Nuñez, C. A. Guerrero Fajardo, y F. E. Sierra Vargas, «Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación», *ITECKNE*, vol. 9, n.º 1, jul. 2012, doi: 10.15332/iteckne.v9i1.57.
- [23] N. D. Montiel-Bohórquez, J. F. Pérez, N. D. Montiel-Bohórquez, y J. F. Pérez, «Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas», *Inf. Tecnológica*, vol. 30, n.º 1, pp. 273-284, feb. 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000100273.
- [24] J. A. Poletto y C. L. da Silva, «Influencia de la Separación de Residuos Sólidos Urbanos para Reciclaje en el Proceso de Incineración con Generación de Energía», *Inf. Tecnológica*, vol. 20, n.º 2, pp. 105-112, 2009, doi: 10.4067/S0718-07642009000200013.
- [25] C. L. Toledo Medrano y M. Luján Pérez, «Caracterización de residuos sólidos urbanos y análisis de opciones de revalorización de materiales en el municipio de Cercado, Cochabamba, Bolivia», *Acta Nova*, vol. 4, n.º 1, pp. 3-21, dic. 2008.
- [26] R. Chandrappa y D. B. Das, *Solid Waste Management: Principles and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-28681-0.
- [27] H. Shi, N. Mahinpey, A. Aqsha, y R. Silberman, «Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste», *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 34-47, feb. 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.09.036.
- [28] S. A. Vidaurre, J. B. Beorlegui, y R. Roca, «Proyecto piloto de generación de energía eléctrica mediante gasificación en comunidades amazónicas aisladas», Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, España. [En línea]. Disponible en: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/4243/577621.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [29] I. Cepeda González, *Economía para ingenieros*. Madrid: Thomson, 2011.
- [30] Comité nacional de despacho de carga, «Reglamento de precios y tarifas». 2021.
- [31] Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear, «Resolución AETN N° 343/2021». 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cre.com.bo/wp-content/uploads/2022/01/AETN_R-0343-2021_Procedimiento-Retribuci%C3%B3n.pdf