

# Gasificación de Desechos Agrícolas de la Zona de la Bahía de Jiquilisco

J. Alas, E. Amaya, E. Funes, G. Sorto, Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales, UCA.

**Resumen**—Este trabajo aborda el uso de desechos agrícolas como materia prima para la gasificación y la evaluación del syngas que se obtiene como combustible. Se utilizaron los desechos provenientes del cultivo y procesamiento de marañón: cáscara de la semilla marañón, hollejo de la semilla de marañón, estopa de coco y olote. Previo a la gasificación se midieron las propiedades de porcentaje de humedad y cenizas, densidad aparente y poder calorífico de los desechos. Se gasificaron los desechos y se verificó la generación de un combustible gaseoso para la cáscara de semilla de marañón y olote. Para la estopa de coco se alcanzaron las temperaturas necesarias para llevar a cabo la gasificación, sin embargo las concentraciones obtenidas de syngas fueron muy pequeñas e insuficientes para alcanzar la combustión. Con el hollejo de la semilla marañón no se lograron las condiciones necesarias por la naturaleza del desecho, debido a que la alimentación al reactor no era la adecuada en función del tamaño del desecho y su densidad aparente. Por último, puesto que no se contó con equipo para la medición de la composición del syngas obtenido, se propone y evalúa el poder calorífico del mismo mediante una comparación de propiedades termodinámicas.

**Índice de términos**—Bahía de Jiquilisco, Desechos Agrícolas, Gasificación, Syngas.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la crisis energética en los últimos años ha causado fuertes impactos en las economías de muchos países, la mayoría de los cuales se presentan vulnerables a los cambios en los precios del crudo.

El Salvador no es la excepción a esta situación, en especial considerando la forma en que la matriz energética se encuentra distribuida, siendo la energía térmica la segunda fuente de energía del país con 33.8% del total, siendo ligeramente inferior a la proporcionada por la energía hidroeléctrica que tiene 35.7%, pero superior al resto de fuentes de energía del país como lo son la energía geotérmica con 24.4%, 3.0% de las importaciones y 3.1% de la biomasa

[1]. Este último aporte proveniente de la biomasa es producto principalmente del sector azucarero mediante el aprovechamiento del bagazo de caña, sin embargo no se conoce del empleo de otros desechos que intervengan en la producción de energía.

El interés por dar un uso a los desechos provenientes de actividades agrícolas proviene como propuesta alternativa a los problemas de gestión de desechos en El Salvador y como búsqueda de fuentes de energía renovable. En la actualidad su aprovechamiento se ha limitado únicamente a usos convencionales como alimento para ganado, abono, entre otros.

Dentro de las tecnologías que se han empleado en los esfuerzos por utilizar los desechos agrícolas para la producción de energía se encuentra la gasificación, sin embargo, a nivel nacional son pocos los antecedentes que se tienen de la misma, aun cuando esta tecnología representa un fuerte aporte a la matriz energética de muchos países.

Concretamente la gasificación en el país ha sido llevada a cabo mediante un proyecto de puesta en marcha de dos unidades generadoras por gasificación de biomasa y mediante dos trabajos de graduación a nivel de investigación.

El proyecto de puesta en marcha de las unidades de gasificación logró determinar la eficiencia de funcionamiento de las unidades, así como la capacidad de desempeño y su potencial para generar energía eléctrica y térmica [2]. Por su parte los trabajos de graduación proveen más información en cuanto a los resultados de trabajar con distintas materias primas, siendo el café y algunos desechos de la Bahía de Jiquilisco, las materias primas a emplear en cada trabajo. El primero de estos brinda información en cuanto a la composición química del gas obtenido y la comparación de datos del desempeño de la gasificación con los datos de diseño del fabricante [3]. Por su parte el otro trabajo de graduación comprende la puesta en marcha de un gasificador como unidad experimental, así como un estudio preliminar de los desechos de la zona de la Bahía de Jiquilisco [4].

Estos antecedentes reflejan lo prematura que se encuentra la gasificación en El Salvador y lo mucho que queda por recorrer en materia de investigación, pero a la vez permite considerar a la gasificación como una posible solución al aprovechamiento de los desechos agrícolas para utilizarlos como materia prima en la producción de energía. En ese sentido, se hace necesaria la investigación para evaluar el desempeño de diferentes desechos agrícolas en la gasificación evaluando inicialmente las características de los desechos escogidos. Siendo necesario además, la evaluación del syngas

que se obtiene en proceso con su poder calorífico, para su posible aprovechamiento en la producción de energía.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *A. Metodologías para la caracterización de los residuos*

Las propiedades que se cuantificaron para la caracterización previa de los desechos agrícolas fueron porcentajes de humedad y cenizas, densidad aparente y poder calorífico. Estas caracterizaciones para cada desecho se realizaron mediante métodos ASTM.

Las normas ASTM utilizadas fueron adaptadas debido a que la biomasa presenta gran similitud en sus propiedades a los materiales para los cuales fueron diseñados estos procedimientos, motivo por el cual se emplean con un grado razonable de confianza.

Para llevar a cabo la caracterización de los desechos se procedió de la siguiente forma:

- Toma de muestras
- Preparación de las muestras para la prueba
- Ejecución de la norma ASTM

#### *1) Toma de muestras*

Para realizar el muestreo de los desechos a analizar se hizo uso de la norma ASTM D346 / D346M - 11 Standard Practice for Collection and Preparation of Coke Samples for Laboratory Analysis.

#### *2) Preparación de las muestras para la prueba*

La preparación de las muestras se realizó reduciendo el tamaño del desecho. Dependiendo de la prueba en la que se emplearía el desecho así era la reducción de tamaño realizada. La figura 1 muestra un esquema de la forma en que se procedió a realizar la reducción de tamaño y permite apreciar los desechos que necesitaron reducción de tamaño.

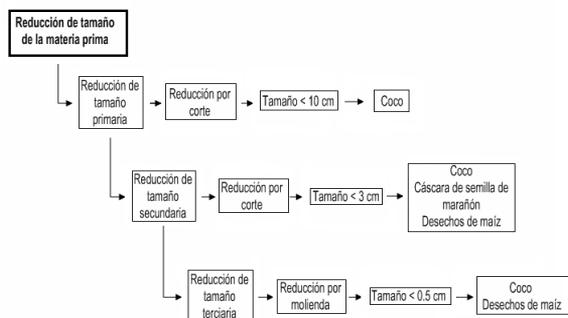


Fig. 1 Esquema de reducción de tamaño a la biomasa.

Para el caso de la cáscara de semilla de marañón, se realizó una extracción del líquido que esta posee conocido como CashewNut Shell Liquid o CNSL por sus siglas en inglés, ello se realizó con una prensa mecánica a manera de realizar pruebas de variación de parámetros y gasificación de la cáscara de semilla de marañón con y sin dicho líquido.

### 3) Ejecución de la norma ASTM.

La TABLA I resume los procedimientos ASTM utilizados para cada prueba de caracterización abordada.

TABLA I  
RESUMEN DE PROCEDIMIENTOS ASTM

Determinación de humedad	ASTM D871 - 82(1998) Standard Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels
Determinación de cenizas	ASTM E1755 - 01(2007) Standard Test Method for Ash in Biomass
Determinación de densidad aparente	ASTM E873 - 82(2006) Standard Test Method for Bulk Density of Densified Particulate Biomass Fuels
Determinación del poder calorífico	ASTM D2015 - 00 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter

### B. Metodología para la generación de syngas

Las pruebas de gasificación y la generación de syngas fueron llevadas a cabo en el equipo de gasificación con que cuenta la Universidad. El gasificador tipo downdraftV4 GEK TOTTI se operó en conjunto a un compresor de aire portátil Champion modelo BV1 tal y como se muestra en la figura 2.

Sistemáticamente, durante todas las pruebas, se procedió de la siguiente manera:

- *Dosificación de la biomasa*
- *Conexión del compresor*
- *Ignición de la biomasa*
- *Encendido de la llama*
- *Ajuste de parámetros para sostenimiento de la llama*

### C. Metodología para la evaluación de la calidad del syngas producido

La calidad del syngas depende del uso que este tenga. La propiedad que se evaluó en este trabajo para la determinación de la calidad fue el poder calorífico.

#### 1) Método cualitativo para la comparación de la calidad del syngas obtenido

Se consideró como primera alternativa una comparación en la que se evaluó el tiempo en que se elevó a una temperatura definida una cantidad específica de agua. El calentamiento del agua fue a través de la llama que se obtuvo de la combustión del syngas. Este método es una aproximación cualitativa puesto que compara únicamente los tiempos de calentamiento del agua con diferentes llamas, sin poder proceder a un cálculo de la cantidad de energía absorbida.

Para implementar esta metodología se definió un aumento en la temperatura de 10°C en un litro de agua y se utilizaron por equipos un soporte universal, una pinza de sostén, una pinza de extensión, un matraz volumétrico de 1 litro y un termómetro de líquido en vidrio.

Se acopló al soporte universal la pinza de sostén y en ella la pinza de extensión, mediante esta última se sostuvo el matraz

volumétrico aforado a un litro de agua. Este equipo se adaptó a la antorcha del gasificador en donde se obtuvo la llama y con el termómetro se registró el cambio de temperatura del agua. El matraz volumétrico se colocó cinco centímetros por encima de la antorcha del gasificador. Un esquema del equipo acoplado al gasificador se muestra en la figura 2.

Armado el sistema se procedió a realizar las pruebas de gasificación para los cinco desechos evaluados cuando el equipo se encontraba operando de forma estable e ininterrumpida. Se tomó nota de la temperatura inicial del agua, luego se tomó nota del tiempo en que se elevó la temperatura 10°C por encima de la inicial. Esta prueba se realizó por duplicado para cada desecho.

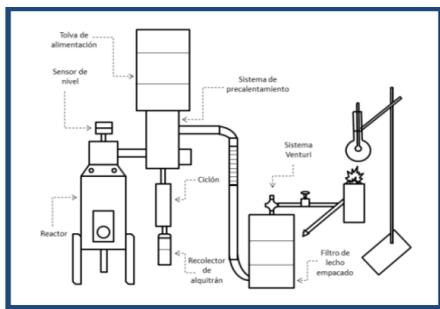


Fig. 2. Esquema del sistema empleado para la caracterización del syngas producido.

## 2) Determinación cuantitativa del poder calorífico del syngas producido

La metodología utilizada recurre a un análisis comparativo de propiedades termodinámicas para la obtención de los resultados. Para esto se adaptó una metodología presentada en el trabajo "Biogás e Isobutano: análisis comparativo de una propiedad termodinámica", ver [5] Concretamente se realizó la comparación entre el syngas obtenido de la gasificación y otro gas de propiedades conocidas, para el caso se utilizó gas licuado del petróleo (GLP), conocido comúnmente como propano o gas de cocina. La prueba tiene como fundamento el cálculo del rendimiento de combustión de un gas de

propiedades conocidas. Luego de una posterior comparación se realizan ciertos cálculos que obtendrán por resultado final el poder calorífico inferior del syngas.

La prueba requiere inicialmente de la elaboración de un gasómetro, mismo que almacenó un volumen de gas definido. En cada prueba ambos gases debían estar sometidos a condiciones iguales de temperatura y presión, bajo las cuales un volumen de 5 litros de cada gas es quemado para calentar un volumen de 1 litro de agua. La variación en la temperatura del agua es reportada para realizar los cálculos de poder calorífico respectivos.

- Elaboración del gasómetro

Para construir el gasómetro que contendría los gases, se utilizó un recipiente de plástico de 5 galones, transparente para facilitar la observación del nivel del agua que se utilizó para medir la presión. Dicho recipiente debe ser capaz de contener como mínimo 6 litros de gas y cumplir con que la prueba se inicia ejerciendo una presión equivalente a una altura de 17.4 cm de agua se y finaliza con al menos 1 litro de gas y con una presión equivalente a una altura de 6.5 cm de agua. A continuación se ajustó el recipiente de plástico y se colocaron soportes en la base del recipiente con agua para asegurar poco desplazamiento del recipiente contenedor de gases. Al gasómetro se le adaptó una manguera para la extracción de los gases y esta se conectó al mechero que se emplearía durante las pruebas.

La toma del syngas proveniente del gasificador hacia el gasómetro, se logró colocando una manguera que comunicaba el filtro por el que pasa el syngas, hacia una bomba computarizada peristáltica Masterflex L/S con propulsor modelo 7550-10 y cabezal modelo 77200-62, la cual enviaba el syngas hacia el gasómetro tal y como se muestra en el esquema de la figura 3.

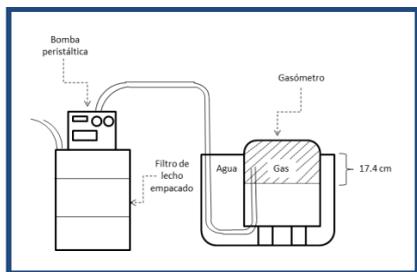


Fig. 3. Esquema del gasómetro empleado.

- Desarrollo de la prueba

La prueba comienza cargando el gasómetro con el gas a utilizar hasta obtener la altura definida de 17.4 cm de agua como presión ejercida sobre el gas. Para el caso del syngas, fue necesario primero comenzar la gasificación y esperar a un flujo constante y estable. En el caso del gas de comparación, este se desplazó directamente por medio de una manguera desde el contenedor, hacia el gasómetro. Contenido el syngas hasta la altura deseada, se arma el sistema para la combustión del mismo, colocando el mechero Bunsen a una distancia de 2 cm por debajo de un balón conteniendo 1 litro de agua. El otro extremo de la manguera se encuentra en el gasómetro, donde por efecto de la presión, se dirigirá al mechero.

Para las condiciones iniciales de volumen de 5 litros de gas y presión de columna de agua de 17.4 cm, se arranca la prueba tomando nota de las condiciones de temperatura inicial del agua, presión manométrica, presión atmosférica, volumen inicial y volumen final. La prueba finaliza cuando la presión de columna de agua es de 6.5 cm, momento en que se registran los últimos datos de la prueba para los posteriores cálculos. La forma como se ajustaron los instrumentos para realizar la combustión de los gases se presenta en la figura 4.

Concluida esta prueba debe repetirse de manera consecutiva con el otro gas siendo importante garantizar que se apliquen las mismas condiciones de presión atmosférica,

temperatura ambiente, entre otros, para minimizar las imprecisiones producto de las diferencias entre los ensayos.

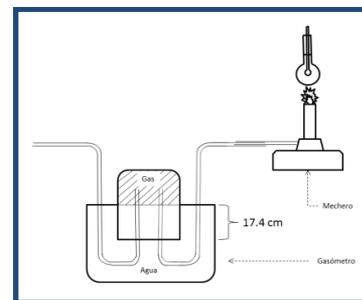


Fig. 4. Esquema de la combustión del gas proveniente del gasómetro.

Se realizaron dos pruebas por desecho gasificado. Para el primer cálculo se estima la masa del gas combustible del que se conocen sus propiedades, en este caso el GLP. Esta masa se calcula a través de la ecuación de estado despejada para la masa del gas:

$$\text{---} \quad (1)$$

En donde:

- : es la constante particular del gas, que se obtiene con la constante universal de los gases dividida entre su masa molecular, para esto se tomó una composición típica de GLP, según García et al, ver [6].
- : es la temperatura del gas, que es equivalente a la temperatura ambiente, ya que el experimento se realiza a temperatura ambiente.
- : es la presión del gas
- : es el volumen de gas.
- : es la masa buscada del gas.

A partir de la ecuación 1 se obtuvo la masa de GLP quemado. Con la masa de gas quemado, puesto que se

conoce el volumen del gas  $V$ , se calcula la densidad  $D_i$ . Luego se calculó el calor entregado por el gas al quemarse,  $Q_i$ , que será igual al producto de su poder calorífico multiplicado por su masa  $M_i$ , como se muestra en la ecuación 2:

—

Por otro lado, se calcula el calor absorbido por el agua por la combustión. Este calor,  $Q_{ai}$ , se calculará de acuerdo a la definición de calor como la masa del cuerpo  $m$ , multiplicado por su capacidad calorífica  $c_e$ , por el aumento de temperatura  $\Delta T$  como se muestra a continuación:

Del calor que entrega el GLP al quemarse, no todo se transfiere al agua, ya que se pierde al ambiente una parte. Entonces, a partir del calor liberado  $Q_i$  y el calor absorbido por el agua se procede a calcular el rendimiento de la combustión:

—

Esta metodología supone que el rendimiento de la combustión será el mismo al quemar el syngas bajo las mismas condiciones tal como se mencionó anteriormente. Una vez conocido el rendimiento de esta combustión se calcula hacia atrás el poder calorífico inferior del syngas.

Posteriormente se calculó la masa del syngas que se quema en el mechero con la ecuación 1. Luego se calcula el calor absorbido por el agua al quemarse el syngas a través de la ecuación 3. Seguido, con el rendimiento de la combustión calculado con la ecuación 4 se procedió a la estimación del calor liberado por la combustión del syngas despejando de esta ecuación la variable  $Q_i$ . Una vez conocido el calor liberado al quemarse el syngas se despejó el poder calorífico inferior de la ecuación 2.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Caracterización de desechos

De los desechos seleccionados el hollejo de la semilla de marañón fue el que menor humedad presentó, a excepción de la cáscara de la semilla de marañón sin CNSL, todos presentaron un porcentaje de humedad menor al 10% lo cual es muy favorable. Por otro lado, la estopa de coco presentó el mayor porcentaje de ceniza entre todos, de manera que un mayor porcentaje de cenizas en el proceso de gasificación era esperado. En cuanto a la densidad aparente, la cáscara de la semilla de marañón es el desecho que ocupa menor volumen por unidad de masa, y es el que presenta también la mayor densidad energética, reportándose para este desecho un poder calorífico superior mayor, en comparación con los otros. Los resultados obtenidos para la caracterización de desechos se presentan en la TABLA II.

TABLA II  
RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN CUANTITATIVA DE DESECHOS

Propiedad	Estopa de coco	Cáscara de semilla de marañón	Cáscara de semilla de marañón sin CNSL	Hollejo de semilla de marañón	Olote
Porcentaje de humedad (%)	9.99	9.77	10.63	6.61	7.67
Porcentaje de cenizas (%)	4.22	2.01	2.04	2.78	2.37
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.10	0.42	0.53	0.29	0.21
Poder calorífico superior (J/g)	17710	23428	4149.5	22702	17227

### B. Generación de syngas

Las pruebas de gasificación permitieron la recolección de la información mediante la cual se identificaron las relaciones entre las variables de operación y la generación del syngas. Todos los desechos fueron gasificables con la excepción del

hollejo de semilla de marañón que simplemente no generó syngas y el caso del coco que generó syngas pero en concentraciones muy bajas como para entrar en combustión, y dentro de los desechos que sí se lograron gasificar, destacan diferentes resultados en relación a las temperaturas alcanzadas, la presión de vacío necesitada, el volumen de alquitrán recolectado, etc., variables cuya interacción se estudió para cada desecho y relacionó con los resultados de los demás desechos.

#### 1) Cáscara de semilla de marañón:

Algunos de los elementos más destacables sobre las pruebas realizadas con la cáscara de semilla de marañón son:

- Presentó un tamaño de partícula adecuado y no fue requerida una reducción de tamaño.
- Durante los ensayos realizados presentó facilidad en la generación y sostenibilidad de la llama.
- La presión de vacío óptima determinada para el proceso de gasificación se mantuvo alrededor de 7 pulgadas de agua.
- Presentó los mayores volúmenes producidos de alquitrán y estos mostraron un aspecto muy denso, viscoso y de color negro.

Un perfil representativo del comportamiento de las temperaturas alcanzadas en el gasificador es el mostrado en la figura 5.

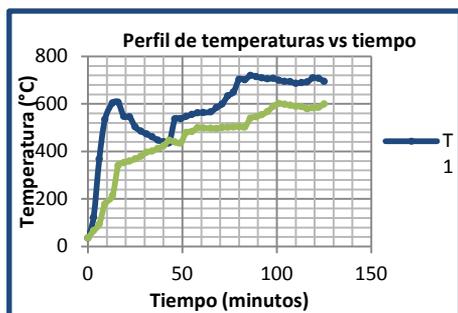


Fig. 5 Perfil de temperaturas versus tiempo para la cáscara de semilla de marañón.

#### 2) Cáscara de semilla de marañón sin CNSL:

Algunos de los elementos más destacables sobre las pruebas realizadas con la cáscara de semilla de marañón sin CNSL son:

- Presentó volúmenes despreciables de alquitranes producidos con respecto a los otros desechos evaluados.
- La presión de vacío óptima determinada para el proceso de gasificación se mantuvo alrededor de 3.2 pulgadas de agua.
- Durante los ensayos realizados presentó facilidad en la generación y sostenibilidad de la llama.
- Los alquitranes producidos, aunque pocos, presentaron en contraste a la cáscara de semilla de marañón con su CNSL una consistencia menos densa, más fluida y de un color más claro.
- Una mayor tasa de consumo de biomasa se obtuvo al disminuir el tamaño de partícula de la cáscara de semilla de marañón.

Un perfil muy representativo del comportamiento de las temperaturas alcanzadas en el gasificador es el mostrado en la figura 6.

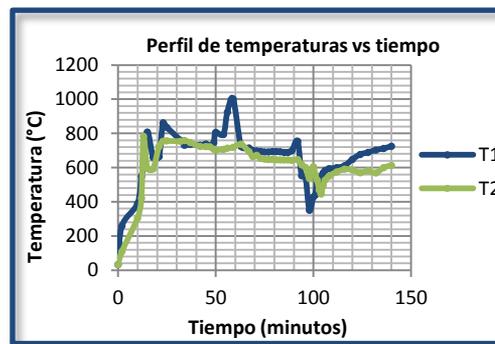


Fig. 6 Perfil de temperaturas versus tiempo para la cáscara de semilla de marañón sin CNSL

### 3) Estopa de coco:

Algunos de los elementos más destacables sobre las pruebas realizadas con la estopa de coco son:

- Requirió de una reducción de tamaño hasta alcanzar un tamaño adecuado de partícula capaz de pasar a través del sistema de alimentación y lograr ser alimentada al gasificador.
- Este desecho presentó dificultades en el proceso de gasificación ya que a pesar de alcanzar altas temperaturas en las zonas de combustión y reducción, no se logró encender o generar la llama.
- No se alcanzó una gasificación óptima ya que la ausencia de llama se manifestó en todas las pruebas realizadas.
- A pesar de no haber logrado generar la llama, la estopa de coco sí sufrió un proceso de pirólisis y los volúmenes de alquitrán fueron un indicativo de lo mismo. Estos alquitranes fueron típicamente de color negro pero de aspecto más fluido ya que no parecían ser tan viscosos como los descritos para la cáscara de semilla de marañón.

Un perfil muy representativo del comportamiento de las temperaturas alcanzadas en el gasificador es el mostrado en la figura 7.

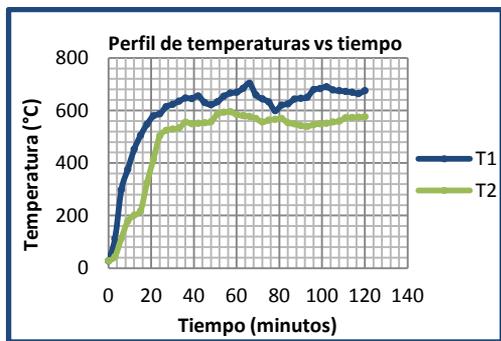


Fig. 7 Perfil de temperaturas versus tiempo para la estopa de coco.

### 4) Hollejo de semilla de marañón:

Aunque el tamaño de partícula al ser tan pequeño no causó problemas de alimentación al equipo, esto mismo pudiera ser la causa por la que todos los esfuerzos por encender el desecho terminaron sin lograr su objetivo. Aunque la gasificación no se alcanzó, se recopilaron temperaturas que describen el comportamiento de las zonas de combustión y reducción al interior de equipo durante los ensayos realizados. Un ejemplo típico de esas temperaturas alcanzadas en el gasificador es el mostrado en la figura 8.

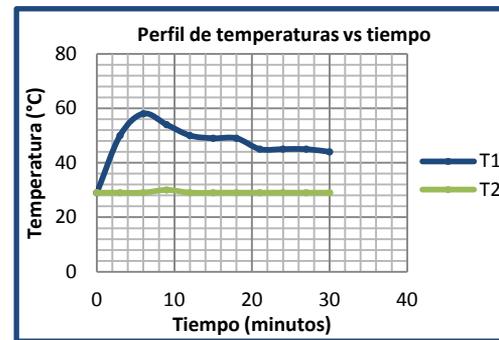


Fig. 8 Perfil de temperaturas versus tiempo para el hollejo de semilla de marañón.

### 5) Olote:

Algunos de los elementos más destacables sobre las pruebas realizadas con el olote son:

- Presentó necesidad de una reducción de tamaño para poder someterlo a los ensayos de gasificación.
- Durante los ensayos presentó facilidad para la generación y sostenibilidad de la llama.
- La presión de vacío óptima determinada para el proceso de gasificación durante los ensayos realizados fue de 10 pulgadas de agua.
- La gasificación presentó también producción de alquitranes, aunque estos volúmenes no superaron a los generados en los ensayos con la cáscara de semilla de marañón. Los alquitranes producidos presentaron un aspecto

denso y de color negro aunque no tan viscosos como los presentados por la cáscara de semilla de marañón.

- El consumo de desecho asociado a la producción de alquitranes es importante ya que para el caso del olote, éste consumió aproximadamente la mitad de lo que se consumió de cáscara de semilla de marañón.

Un perfil muy representativo del comportamiento de las temperaturas alcanzadas en el gasificador es el mostrado en la figura 9.

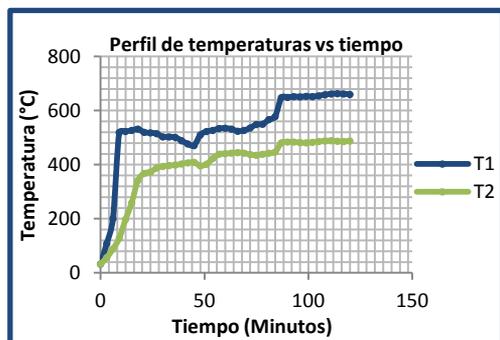


Fig. 9 Perfil de temperaturas versus tiempo para el olote.

### C. Interacción de variables y comparación entre desechos

A partir de los resultados de la gasificación se pudieron apreciar ciertas relaciones entre algunas variables de operación, concretamente entre el volumen de alquitrán, las temperaturas y la presión de vacío. A grandes rasgos, para cada uno de los distintos desechos evaluados se observa lo siguiente:

#### 1) Volumen de alquitrán y temperaturas:

El volumen de alquitranes producidos se minimiza en aquellos ensayos en los que las temperaturas alcanzadas en el gasificador son mayores, esto como consecuencia de una mayor tasa de craqueo de los compuestos más pesados con largas cadenas de carbono en su estructura química. En contraste a esto, aquellos ensayos en los que se maximiza la

cantidad de alquitranes producidos, son los que alcanzan las temperaturas más bajas en las pruebas reportadas. Esto se aprecia mejor en la figura 10 y figura 11.

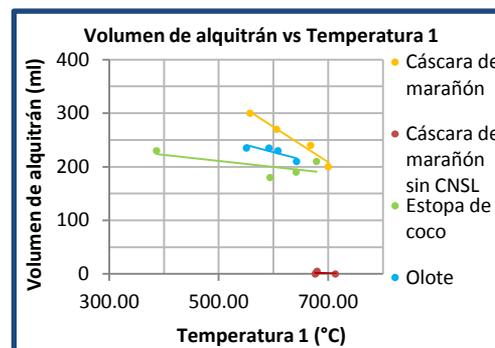


Fig. 10 Volumen de alquitrán vs temperatura 1.

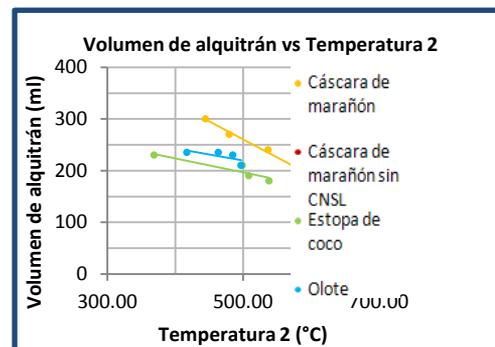


Fig. 11 Volumen de alquitrán vs temperatura 2.

#### 2) Temperaturas y presión de vacío:

Existe también correspondencia entre la presión de vacío con la que se operaron los distintos ensayos y las temperaturas alcanzadas dentro del equipo, ya que una mayor caída de presión en el gasificador generaba una mayor alimentación de aire hacia la zona de combustión, traduciéndose esto en un incremento en las temperaturas 1 y 2. En promedio, cuando se operó el equipo con las mayores y menores presiones de vacío, se registraron las mayores y menores temperaturas

promedio, respectivamente. Esto se aprecia mejor en la figura 12 y figura 13.

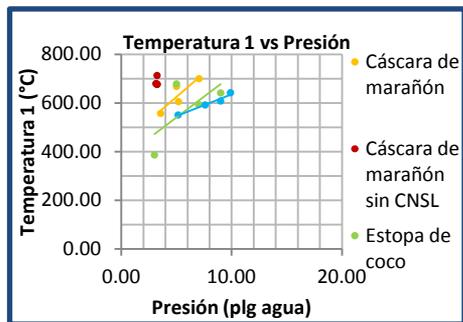


Fig. 12 Temperatura 1 vs presión.

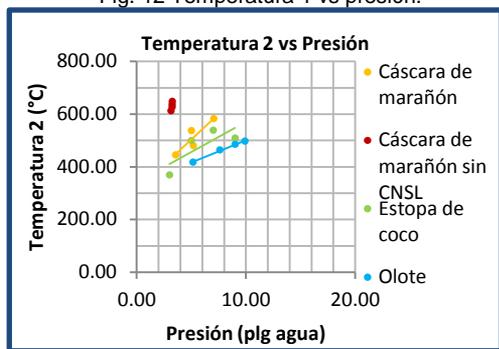


Fig. 13 Temperatura 2 vs presión.

### 3) Presión de vacío y volumen de alquitrán:

Así mismo, existe una relación entre la presión de vacío utilizada durante la operación para los distintos ensayos y el consecuente volumen de alquitranes producido. En la figura 14 se observa la tendencia a producir mayores volúmenes de alquitrán a medida que se utilizaban menores presiones de vacío. Así mismo, para los ensayos que presentaron menores volúmenes de alquitrán, corresponden mayores presiones de vacío utilizadas durante las distintas pruebas. Nuevamente, este comportamiento se explicaría sobre la base de una mayor

tasa de craqueo de los alquitranes generados durante la pirólisis.

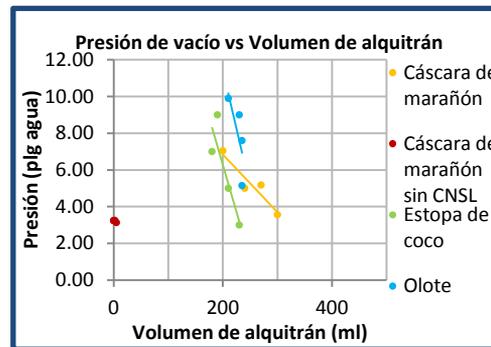


Fig. 14 Presión de vacío vs volumen de alquitrán.

### D. Comparación cualitativa

Los resultados de la evaluación cualitativa se muestran en la TABLA III.

TABLA III  
RESULTADOS DE COMPARACIÓN CUALITATIVA

Desecho	Tiempo 1 (min:s)	Tiempo 2 (min:s)	Promedio (min:s)
Cáscara de semilla de marañón	08:35	08:06	08:20
Cáscara de semilla de marañón sin CNSL	10:12	09:36	10:24
Olote	09:33	08:58	09:15

La tabla III permite observar que la combustión del syngas proveniente de la cáscara de la semilla de marañón fue la que produjo el aumento de temperatura a una mayor velocidad a la masa definida de agua. Seguido, se encuentra el olote, en el que la llama necesitó cerca de un minuto más para provocar el mismo cambio de temperatura en comparación con la cáscara de semilla de marañón. Por último, se encuentra la cáscara de la semilla de marañón sin CNSL que necesitó un tiempo adicional para provocar el mismo cambio de temperatura. Para el caso anterior este tiempo adicional puede estar relacionado

con que la llama era más pequeña en comparación con las otras, porque se extraía menos syngas.

#### E. Comparación cuantitativa

Las condiciones ambientales promedio bajo las cuales se realizaron las pruebas de comparación cuantitativa se presentan en la TABLA IV.

TABLA IV  
CONDICIONES AMBIENTALES PROMEDIO

Temperatura ambiental (°C)	28.4	Volumen inicial (l)	6
Presión atmosférica (mm Hg)	696	Volumen final (l)	5
Presión manométrica (cm H <sub>2</sub> O)	12	Temperatura inicial del agua (°C)	28

En la TABLA V se indican los valores promedio de temperatura final del agua, variación de temperatura  $\Delta T$  (con relación a la temperatura inicial del agua de 28°C) y duración del ensayo para el syngas de la cáscara de semilla de marañón, olote y GLP. Cabe destacar que para las pruebas realizadas del syngas de ambas materias primas, la llama en el mechero no se logró mantener continua para ninguno de los ensayos. Se tuvo mucha dificultad para lograr quemar el gas de esta forma puesto que el gas se encontraba húmedo y las condiciones ambientales no eran las más favorables, además la elevación de temperatura del agua observada fue pequeña debido a esta dificultad presentada. Esta llama obtenida era mucho más evidente al inicio de la prueba, luego se encendió débilmente en cortos períodos. Para el caso de la quema del GLP bajo estas mismas condiciones no se observó limitante alguna.

De los resultados presentados en la TABLA V se calculó el poder calorífico inferior de estos desechos. La TABLA VI presenta los poderes caloríficos inferiores calculados, los cuales se muestran para las condiciones ambientales mencionadas en la TABLA IV. De acuerdo a los resultados obtenidos es necesaria una verificación mediante métodos instrumentales de laboratorio. No obstante, el hecho de que el

syngas proveniente de la cáscara de semilla de marañón logró sostenerse más en el mechero y elevar más la temperatura del agua, indica un poder calorífico inferior más alto que el del syngas proveniente del olote, tal como se puede constatar en los cálculos realizados.

TABLA V  
RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN CUANTITATIVA DE DESECHOS

Desecho	Resultados de la prueba		
Cáscara de semilla de marañón	Syngas del desecho		
	Temperatura final del agua (°C)	$\Delta T$ (°C)	Duración de la llama (s)
	33	5	152
	GLP		
	Temperatura final del agua (°C)	$\Delta T$ (°C)	Duración de la llama (s)
	71	43	139
Olote	Syngas del desecho		
	Temperatura final del agua (°C)	$\Delta T$ (°C)	Duración de la llama (s)
	31.5	3.5	138
	GLP		
	Temperatura final del agua (°C)	$\Delta T$ (°C)	Duración de la llama (s)
	73	45	125

TABLA VI  
PODERES CALORÍFICOS INFERIORES CALCULADOS

Desecho agrícola	Poder calorífico inferior del syngas (MJ/m <sup>3</sup> )
Cáscara de semilla de marañón	10.11
Olote	6.06

#### CONCLUSIONES

En base a las propiedades medidas experimentalmente a los desechos, humedad, cenizas, poder calorífico y densidad aparente, se obtuvieron mejores características para el proceso de gasificación con la cáscara de semilla de marañón y la estopa de coco. En el caso de la densidad aparente, al reducirse el tamaño de los desechos se ve reducido por la disminución de los intersticios. Además, se sabe que desechos

como el olote del maíz y la estopa de coco se ven sometidos a procesos térmicos previos antes de ser desechados, que es la razón por la cual se reportó porcentajes de humedad bajos y favorables. En ese sentido, estas propiedades no significaron necesariamente que se obtuvieran los mejores resultados en la gasificación.

De las pruebas de gasificación desarrolladas los desechos en los que se verificó generación de syngas fueron: cáscara de semilla de marañón, acorde a lo esperado por las propiedades del desecho, y el olote. Contrastando estos resultados, en base a la caracterización previa, la generación de syngas utilizando estopa de coco fue mínima ya que las concentraciones obtenidas fueron insuficientes para lograr la combustión, a pesar que este desecho cumple con parámetros como humedad baja y poder calorífico alto, y que en la operación se lograron las temperaturas necesarias para el proceso. Por otro lado, el olote generó syngas sostenidamente, a pesar de que en comparación con los otros desechos, no poseía las mejores características. El hollejo de semilla de marañón fue incapaz de generar syngas puesto que no logró superar la etapa de encendido del equipo en las pruebas realizadas.

Los desechos para los que no se verificó la generación de syngas tienen en común que sus propiedades físicas no responden a las deseadas para su utilización en el reactor con que se trabajó, ya que de acuerdo a sus propiedades químicas se espera una generación de syngas. Así pues, la estopa de coco, por su naturaleza fibrosa y de baja densidad dificultó su flujo continuo al reactor, a pesar de que se adecuó su tamaño. Además, su baja densidad afectó de manera directa a que la concentración del syngas generado no fuera la suficiente para mantener sostenida la combustión de este. Se intuye que el hollejo de semilla de marañón no superó la etapa de encendido porque las condiciones del reactor no eran las apropiadas para la naturaleza de este desecho y la naturaleza de la misma sofoca la combustión.

En cuanto a la operación del sistema para la generación del syngas existen correspondencias entre las variables de

operación, que fueron consistentes para los desechos evaluados. En primer lugar, la producción de alquitranes se minimiza al alcanzar temperaturas altas, correspondiendo a lo esperado teóricamente, porque a estas temperaturas se favorecen las reacciones de rompimiento de cadenas largas que componen a los alquitranes. Seguidamente, una mayor diferencia de presión incide directamente en el aumento de temperaturas puesto que conlleva a una mayor alimentación de aire al reactor. Consecuentemente, las dos relaciones previamente descritas implican que una mayor diferencia de presión produce un menor volumen de alquitranes, lo cual también se verificó.

Cualitativamente, la calidad del syngas generado a partir de la cáscara de semilla de marañón es mayor a la presentada por sus homólogos provenientes del olote y la cáscara de semilla de marañón sin CNSL. Esto sin considerar las imprecisiones involucradas a falta de poder garantizar las mismas condiciones en todos los ensayos.

Por otro lado, a pesar de que se obtuvieron valores de poder calorífico inferior para el syngas proveniente de la cáscara de semilla de marañón y olote, se hace necesaria una verificación mediante métodos instrumentales como una bomba calorimétrica para gases, medición de composición de gases mediante cromatografía u otras. No obstante, esta aproximación cuantitativa obtenida permite observar que el syngas proveniente de la cáscara de la semilla de marañón posee más calidad, al tener un poder calorífico inferior más alto que el syngas proveniente del olote.

Por último, se destaca la necesidad de seguir la evaluación de estos desechos mediante la gasificación. Es importante una profundización en la caracterización de los desechos en cuanto a composición. También se hace necesaria la experimentación de los desechos modificando la propiedad de la densidad relativa mediante briquetas o pellets y así poder comparar el desempeño de los desechos.

## REFERENCIAS

- [1] Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. Sitio web. [Online]. Disponible en: <http://www.siget.com.gob.sv/>. 2011.
- [2] Cerrato, M. y Ravinet, A., *FIU-ARC Proyecto de Demostración y Validación. Gasificación de Biomasa para Generación de Energía*, San Salvador, El Salvador, 2005.
- [3] J. Meléndez, A. Rodríguez y G. Urrutia, "Implementación de la tecnología de la gasificación para operar en los beneficios de café". Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" UCA, San Salvador, El Salvador. 2006.
- [4] K. Ascencio y L. Bollman, "Evaluación del potencial de algunos desechos agrícolas de la Zona de la Bahía de Jiquilisco por medio de la gasificación. Trabajo de graduación de Ingeniería Química, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" UCA, San Salvador, El Salvador. 2011.
- [5] Martina, P.E., E.A., García Solá, J.J. Corace, M.R., Aeberhard, A.M., Ventín, A.M., 2006. *Biogas e Isobutano: Análisis comparativo de una propiedad termodinámica*, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.
- [6] P. Basu. *Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory*. Academic Press, Estados Unidos: Burlington, 2010.

## BIOGRAFÍA

**José Rafael Alas Osegueda**, Ingeniero químico, graduado de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas en 2009. Empleado de la misma universidad desde ese mismo año, como técnico de laboratorio en el Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales.

A partir del año 2010, docente en los cursos de Química General para todas las ingenierías y a partir de 2011, docente de Físicoquímica y Termodinámica para la carrera Ingeniería Química. Director de los trabajos de graduación "Evaluación del potencial energético de algunos desechos de la zona de la Bahía de Jiquilisco" en 2011, "Evaluación experimental del syngas obtenido de la gasificación de desechos agrícolas de la zona de la Bahía de Jiquilisco" en 2012 y actualmente el trabajo "Aprovechamiento de desechos de la producción de semilla de marañón para la generación de energía por medio de la gasificación".

Participación en talleres sobre levantamiento de inventarios de emisiones de contaminantes y programas relacionados con el manejo de compuestos orgánicos persistentes, ambos impartidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ejecutor del proyecto "Potencial de la biomasa como fuente de energía en la zona de la Bahía de Jiquilisco", a completarse en abril de 2013.