Evaluación Sinérgica de la Gasificación de Biomasa Residual en Mezclas de Maíz y Algodón

Rafael D. Gómez^{(1)*}, Diego A Camargo⁽¹⁾, Cristian C Soto⁽¹⁾ y Antonio J. Bula⁽²⁾

(1) Univ. Pontificia Bolivariana, Fac. de Ingenierías y arquitectura, Dpto. de Ing. Mecánica., Carrera 6 No. 97 A - 99 Montería – Colombia (e-mail: rafael.gomezv@upb.edu.co; diego.camargo@upb.edu.co; ccsotoospino@hotmail.com)

(2) Univ. Del Norte, Dpto. de Ing. Mecánica, Km.5 Vía Puerto Colombia, Barranquilla-Colombia (e-mail: abula@uninorte.edu.co)

Recibido Mar. 5, 2019; Aceptado Abr. 18, 2019; Versión final May. 16, 2019, Publicado Dic. 2019

Resumen

Se evaluó el efecto de mezclas (%w) de tusa de residuos de maíz (TM) y cascara de desmote de algodón (CA) sobre el poder calorífico (LHV) y el rendimiento de conversión del carbono. Se realizó un análisis de varianza para comprobar el efecto aislado de la mezcla TM-CA, variando el porcentaje de mezcla entre 100-0, 90-10, 70-30 y 60-40, cambiando el flujo de succión (FS) para mantener el ER entre 0.27-0.35 y temperatura media de 980°C. Se evidenció un efecto sinérgico en el poder calorífico del gas (LHV) para una mezcla TM-CA 90-10, alcanzando un aumento máximo de 22.11% del LHV en comparación a la media global y 26.31% con respecto a la mezcla 100-0 con LHV de 3.8MJ/Nm³. Así mismo se alcanzó una mejora en la conversión de carbono de 20.7%. El trabajo muestra que cuando se emplean mezclas de biomasa, se pueden presentar sinergias, debido a complejas interacciones durante la conversión, y es importante desarrollar herramientas de análisis experimentales que permitan identificarlas.

Palabras clave: gasificación; biomasa residual; sinergia; tusa de maíz,

Synergistic evaluation of residual biomass gasification in mixtures of corn and cotton

Abstract

The effect of mixtures (% w) of corncob (TM) and cotton gin trash (CA) over gas calorific value (LHV) and carbon conversion efficiency was evaluated. An analysis of variance was performed to check the isolated effect of the TM-CA mixture, varying the mixing percentage: 100-0, 90-10, 70-30 and 60-40, changing the suction flow (FS) to maintain the ER between 0.27-0.35 and average temperature of 980 °C. A synergistic effect on the calorific value of the gas (LHV) was demonstrated for a TM-CA 90-10 mixture, reaching a maximum increase of 22.11% of the LHV compared to the global average and 26.31% with respect to the 100-0 mixture. with LHV of 3.8MJ / Nm³. An improvement in the carbon conversion of 20.7% was also achieved. The work shows that if mixtures of biomass are used, synergies can occur, due to complex interactions during the conversion, and that it is important to develop experimental analysis tools to identify them.

Keywords: gasification; waste biomass; synergy; corncob

INTRODUCCIÓN

La gasificación de biomasa es un proceso de transformación de diversas materias primas a base de carbono, hacia tres productos principales, biochar, bioaceite y gas de síntesis debido a una oxidación parcial. Bajo estas condiciones un apreciable número de reacciones químicas pueden ser planteadas durante la gasificación, partiendo de la composición elemental de la biomasa (CHON). Dentro de las aplicaciones del gas, se encuentra el uso para energía térmica, además de un buen poder calorífico de gases, la velocidad de flama aporta calidad como energético (Hernández et al., 2004). Si bien el ER y temperatura afectan termodinámicamente el desempeño de la gasificación desde un análisis de exergía (Mendoza et al., 2012), El rendimiento y la composición del gas producto dependen de diferentes variables como la temperatura de reacción, el agente gasificante, el tipo de biomasa, el tamaño de partícula de la biomasa, la tasa de transferencia de calor, la presión operativa, la relación de equivalencia de aire o agente gasificante, la presencia de catalizadores de las reacciones. Muchas de ellas pueden ser controladas con el diseño del equipo y otras son una función de la composición elemental y lignocelulósica de la biomasa. En los últimos años se han realizado numerosas investigaciones para evaluar la gasificación de biomasa en reactores de lecho fijo, debido a su versatilidad en diseño, bajo costo y fácil implementación.

Los estudios experimentales detallan el efecto de factores operacionales como la relación combustible/aire, velocidad superficial del aire, el empaquetamiento del lecho, contenido de humedad de la biomasa, tamaño de partícula y composición de la biomasa sobre variables de respuesta como el consumo de biomasa, poder calorífico del gas producto y la composición química (Pérez et al., 2012) (Udomsirichakorn y Salam 2014) (Mani et al., 2011). los autores (Pérez et al., 2012) llevaron a cabo un diseño experimental multifactorial con variabilidades entre el 80.8% y 98.8% determinando valores que maximizan el poder calorífico como: velocidad superficial de aire de 0.06m/s, tamaño de partícula entre 2mm y 6mm y un contenido de humedad de 10.62%. Con esto se encontró una relación combustible/aire de 3.2 (ER=0.44), consumo de biomasa de 125 kg/h/m², poder calorífico del gas de 2.97MJ/Nm³ con una composición de gases 8%H₂, 13%CO, 1.4%CH₄, 14.9%CO₂ y 62.7%N₂.

Los autores (Biagini et al., 2016) estudiaron la gasificación de tusa de maíz en un trabajo experimental, empleando un reactor tipo downdraft en una planta de escala industrial demostrativa con una capacidad de 113 Kg/h de biomasa, se ajustaron cuatro tasas de alimentación desde 66 kg/h Hasta 85 kg/h. Se encontró que el efecto de alimentación de biomasa es despreciable en la dinámica del reactor mientras este mantenga un mismo ER. Las mejores condiciones operativas dieron como resultado un gas con un poder calorífico de 5.7 MJ/Nm³ con un ER=0.27, composiciones de gases de 17.3%H₂, 22.6%CO, 1.98%CH₄ con una eficiencia de conversión de gas en frío (CGE) de 67.4%. estos mismos autores (Biagini, Barontini, y Tognotti 2016) posteriormente desarrollaron un modelo de equilibrio para predecir los efectos de los parámetros de la gasificación de biomasa en la composición de gas, poder calorífico y flujos de materia. Para la validación del modelo se llevaron a cabo la gasificación de varios tipos de biomasa incluyendo la tusa de maíz con una tasa de alimentación de biomasa 73 kg/h (base seca), flujo de aire de 85 kg/h y una relación de equivalencia de aire de (ER) de 0,28. Los resultados indicaron un gas con un poder calorífico inferior de (LHV) de 5.74 MJ/Nm³, para una composición de gases 17.5%H₂, 22.61%CO y 2%CH₄. Los autores (Omar et al., 2017) evaluaron la gasificación de residuos de tusa de maíz en un gasificador tipo downdraft. Se estudio el efecto de la humedad entre 5% y 30%, la adición de vapor como agente gasificante y precalentamiento de aire a 70°C. El máximo poder calorífico obtenido fue de 6.72 MJ/Nm³ usando una mezcla de aire-vapor como agente gasificante a 150 °C con un ajuste de ER en 0.3, las composiciones de los gases se reportaron en 21.0%CO, 19.3%H₂ y 6.2%CH₄ (%vol). Se determina que el uso de aire y vapor como agente gasificante mejoran significativamente las reacciones de reformado con vapor incrementando el hidrógeno y el poder calorífico, el precalentamiento del agente oxidante también generó un efecto importante al aumentar la temperatura de gasificación minimizando la producción de alquitranes hasta en 2.2 g/Nm³.

Por otra parte, no se reportan datos en la literatura de la gasificación de residuos de desmote de algodón (CA) en reactores tipo downdraft, no obstante, se ha reportado la gasificación de los tallos de algodón en reactores de lecho fijo. Los autores (Karatas et al., 2013) reportan temperatura de gasificación en 770°C con variaciones en el ER entre 0.36 y 0.71. las composiciones de gases se registraron en 10.51%CO, 7.61%H₂ y 3.05%CH₄ (%vol). (Sulaiman et al., 2017a). La CA es considerada una biomasa suave, esta presenta problemas de empaquetamiento asociadas a su geometría y adhesión de fibras residuales, por lo tanto para el aprovechamiento de estos vía gasificación se hace necesario realizar pretratamientos de densificación energética (Sadaka 2013).

Con respecto a investigaciones de gasificaciones de mezclas de materias primas, los autores (Inayat et al., 2014) estudiaron la cogasificación de biomasa de residuos de hojas de palma de aceite (OPF) con bagazo de caña de azúcar (SCB) y madera, las relaciones de mezclas se en 80:20, 50:50 y 20:80 cogasificando

solo el OPF y se evaluó el perfil de temperaturas y la estabilidad del proceso en el reactor. Se encontró que para la relación 80:20 madera-OPF se obtuvieron los mejores resultados con periodos de gasificación estable hasta por 49.5 minutos. (Sulaiman et al., 2017) estudiaron los efectos de la cogasificación de palma de aceite (CS) con chips de madera (WC) WC/CS, así como las mezclas con hojas de residuos de palma (CF) mediante mezclas WC/CF en presencia de catalizadores. Los resultados revelan que las relaciones de mezcla 70:30 WC:CS incrementan la producción de hidrogeno hasta en un (11.7 vol.%) registrando un incremento de esta especie por encima de un 31% con respecto a las otras condiciones de mezcla. La razón principal para dicho incremento se es la mejora en la estabilidad de la temperatura en la zona de combustión al evitarse el empaquetamiento de biomasa en esta mezcla. Los autores (Inayat et al., 2016) exploran la cogasificación de hojas de palma de aceite (OPF) y cascara de coco (CS) empleando un gasificador de lecho fijo de corriente descendente para relaciones de mezcla OPF/CS 100/0 80/20, 60/40, 40/60 y 20/80 0/100.

Los resultados indicaron un incremento en la composición de CO, H₂ y poder calorífico máxima para la mezcla 40/60 de 18%, 16% y 14% respectivamente, se cuantifico un incremento en la conversión de carbono de 95%. (Wei et al., 2017) estudiaron los efectos de la temperatura de gasificación y relaciones de mezcla entre carbón mineral y biomasa empleando análisis termogravimétricos (TGA). Se analizó la morfología de la estructura para explorar sinergias en la reactividad debido a la mezcla. Los resultados evidenciaron una sinergia que duplica la reactividad promovida por el incremento de la proporción de mezcla de biomasa/carbón una relación de mezcla 1:3 (Carbón mineral - Biomasa) y la temperatura de la gasificación en 1000°C. Este fenómeno se relacionó con la aparición de cenizas de biomasa fundidas ricas en potasio en estado vítreo y su efecto de inhibición debilitado a altas temperaturas. Entre las causas de la sinergia en la cogasificación se encuentra el efecto de la presencia de materiales alcalinotérreos en especial potasio, calcio y sodio en el contenido inorgánico (Zhang y Zheng 2016). El incremento de la alcalinidad en la biomasa da como consecuencia un incremento en la reactividad de la gasificación con CO₂ de los compuestos lignocelulósicos.

Si bien la composición elemental de la TM (Maglinao et al., 2015) y CA (Omar et al., 2017) son similares, la diferencia en la estructura lignocelulósica para ellas revela discrepancias en los campos de bioaceite, biochar y gases no condensables productos de la pirolisis. Resultado de pruebas de pirolisis de TM a una temperatura de 500°C realizados por (Mullen et al., 2010) muestran la generación de campos de bioaceite de 61%, biochar de 18.9% y gases no condensables de 20.3%. (Capareda 2008) evaluó la pirolisis de CA, para la temperatura de 500°C obteniendo una composición bioaceite, biochar y gases de 27%, 38.3% y 34.4% respectivamente. Esto implica que la CA puede generar una mayor disposición de carbono en la zona de reducción, mejorando el craqueo de alquitranes (generados en su mayoría por la TM) y produciendo mayor CO₂. Por tanto, los efectos sinérgicos en la cogasificación pueden generarse tanto a factores físicos al modificar las condiciones del lecho fijo asociados a cambios en la densidad y la relación de forma de la biomasa por la mezcla, como a factores químicos debido al cambio de mecanismos de reacción por las nuevas composiciones lignocelulósicas y minerales en la mezcla. Explicar el origen de estos procesos sinérgicos detalladamente, requiere de complejo trabajo de análisis fenomenológico y químico que permita aislar las variables principales del proceso, la sensibilidad de variables, el efecto de interacción entre variables, evaluación de mecanismos químicos y análisis cinético de las nuevas reacciones propuestas. Este tipo estudios tomaran un tiempo considerable, muchas veces no acordes a los tiempos típicos de procesos transferencia tecnológica, adaptación y/o puesta en marcha de dichas tecnologías a nivel industrial en función de la materia prima disponible.

El presente trabajo evaluó el efecto sinérgico de la mezcla de tusa de maíz y residuos de desmotadora de algodón TM-CA, sobre el poder calorífico del Syngas y el rendimiento de conversión de carbono en la gasificación. Para ello un análisis de varianza (ANOVA) sobre pruebas experimentales a escala piloto fue realizado para la validación estadísticamente la sinergia debido a la mezcla. El efecto sobre el rendimiento de conversión de carbono fue cuantificado a partir de balances de masa sobre componentes químicos principales C, H, O, N a partir de análisis próximo, último y composiciones del Syngas.

METODOLOGIA

Se emplea un reactor tipo corriente descendente comercial WBG-60 Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd, acondicionado con un sistema de depuración del gas de síntesis que incluye ciclón para material sólido (a), lavado húmedo de gases mediante Scrubber (b) y filtro de partículas (c) ver Fig. 1. Un cromatógrafo de gases con detector TCD (d) es usado para la cuantificar la composición de los gases con una metodología de calibración con estándar interno. El flujo de aire y syngas son medidos por medio de flujómetro placa orificio en líneas de corriente, la velocidad de producción de biochar es cuantificada por pesado del biochar acumulado en cámara de fondos y ciclón de cenizas. Se caracterizó la composición

química de TM, CA, mediante la realización de ensayos próximos y elementales. La cogasificación se lleva a cabo con cuatro proporciones en mezcla TM-CA (100-0, 90-80, 70-30, 60-40).

Para descartar una confusión experimental en los resultados debido a otras variables como el ER y la temperatura sobre la composición final del gas y la conversión del carbono, es necesario inducir una variación sobre estos parámetros y contrastarlo en un ANOVA, que nos permite revelar efectos asociados únicamente a la mezcla. Esto se hacen manteniendo un rango de ER entre 0.27 y 0.35 manipulando el flujo de la succión (FS) en una variable categórica de tres niveles. Se registra la humedad de la biomasa empleando una sonda de humedad testo 616. Como hipótesis experimental se plantea que, si al menos uno de los valores medios para la composición de gases y el poder calorífico de la mezcla es distinta del comportamiento lineal predicho por mezcla ideal, a la media global, entonces existirá una relación sinérgica. Para comprobar esto, se ejecutaron un total de 23 pruebas y se analizan los resultados mediante un análisis de varianza. Una vez comprobado el supuesto estadístico, se cuantifica el efecto sinérgico en el poder calorífico en contraste con una condición teórica de mezcla ideal mediante la ecuación 1.

Fig. 1 Esquema de la configuración experimental

$$LHV_{Mezcla} = (1 - M_{ac})LHV_{TM} + M_{CA}LHV_{CA} \quad (1)$$

Donde M_{ac} , LHV_{CA} son; la fracción en masa y el poder calorífico del gas producto de la CA respectivamente y LHV_{TM} es el poder calorífico del gas de gasificación de la tusa sin mezclar. El LHV_{CA} se determinó extrapolando el comportamiento lineal del LHV a partir de la mínima fracción de CA ($M_{CA}=0$) y la máxima fracción de CA ($M_{CA}=1$) medida experimentalmente. La diferencia porcentual entre los experimentos con respecto al poder calorífico y el poder calorífico ideal de la mezcla cuantifican el efecto sinérgico (ES) de gasificación (ver. ecuación 2).

$$ES(\%) = 100 \left(\frac{LHV_{At} - LHV_{Mez}}{LHV_{Mez}} \right) \quad (2)$$

Se lleva a cabo un análisis en el rendimiento de la conversión de carbón contenido en la biomasa, inferido con la lectura de la composición de los gases medidos experimentalmente y un balance de masa descrito en la ecuación 3 con 6 incógnitas: n_{fuel} , n_{air} , n_{gas} , Tar, H_2O , C_{res} .

$$n_{fuel}(1 - ASH) + n_{air} = n_{gas}(vCO + vCO_2 + vCH_4 + vH_2 + vN_2) + Tar + H_2O + n_{Biochar} \quad (3)$$

Donde ASH es la fracción de material inorgánico, n_{fuel} es el flujo molar de biomasa determinado con la composición elemental y el consumo de biomasa en el gasificador, n_{air} flujo molar de aire, n_{fuel} flujo molar del gas producido, H_2O y Tar corresponden a la cantidad de vapor y alquitrán respectivamente. Estos dos últimos son separados en la depuración del gas mediante un Scrubber y $n_{Biochar}$ se define como la cantidad

de biochar producido. Mediante un balance de nitrógeno (ver ecuación 4), se puede relacionar la cantidad de n_{air} y n_{gas} en función de la lectura de concentración de nitrógeno experimentalmente en el cromatógrafo vN_2 (vol.%). Se considera para este balance que la única fuente de esta especie es a través del aire ingresado como agente gasificante dado el bajo porcentaje presente en la biomasa según la información del análisis elemental

$$\frac{n_{gas}}{n_{air}} = \frac{1-0.21}{vN_2} \quad (4)$$

Las tres ecuaciones 5, 6 y 7 provienen del balance de especies CH_mO_n de la biomasa. Los subíndices m y n se determinan con información del análisis elemental. Las composiciones, v_1CO , v_2CO_2 , v_3CH_4 y v_4H_2 son las fracciones volumétricas del gas de síntesis medidos experimentalmente mediante cromatografía. Se considera que el Tar formado es representado mediante la fórmula $C_6H_{6.2}O_{0.2}$ propuesta por (Thunman et al., 2001)

$$C = \dot{n}_{gas}(v_1CO + v_2CO_2 + v_3CH_4) + 6y_1Tar + n_{Biochar}f_{cb} \quad (5)$$

$$\frac{O}{2} + 0.2\dot{n}_{air} + \frac{w}{2} = \dot{n}_{gas}(0.5 \cdot v_1CO + v_2CO_2) + 0.5 \cdot y_2H_2O + 0.1 \cdot y_1Tar \quad (6)$$

$$H + 2w = \dot{n}_{gas}(4 \cdot v_3CH_4 + 2 \cdot v_4H_2) + 6.2y_1Tar + 2 \cdot y_2H_2O \quad (7)$$

Las ecuaciones 4-7 son un sistema cerrado de ecuaciones que nos permiten resolver los factores incógnita del balance(y). Donde f_{cb} es la fracción elemental de carbono presente en el biochar. Como parámetros de análisis se determina el rendimiento de conversión de carbono Y_c (ver ecuación 8) de la biomasa y el poder calorífico del syngas LHV_{syngas} (ver ecuación 9).

$$Y_c = 100 \frac{C - (6y_1Tar + n_{Biochar}f_{cb})}{C} \quad (8)$$

$$LHV_{syngas} = 10.794 \cdot v_4H_2 + 12.6v_1 \cdot CO + 35.87 \cdot v_3CH_4 \text{ (MJ/Nm}^3\text{)} \quad (9)$$

RESULTADOS

Relaciones de masa superiores a 40% de CA no fueron posibles para la gasificación debido a un empaquetamiento de la biomasa en mezcla, no siendo así con la TM la cual tanto en este estudio como en otros no presenta problemas asociados al tránsito en el cono (Lu et al., 2008). La Fig. 2 muestra las mezclas preparadas para la experimentación. La Tabla 1 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica mediante análisis próximo y elemental de las materias primas. El análisis elemental muestra que los residuos de TM y CA muestran valores de carbono con un rango de desviación estándar de ± 1.87 indicando que estas materias primas no presentan una diferencia mayor para este compuesto principal, dejando así claro que no hay un enriquecimiento por adición de carbono en masa para las mezclas desarrolladas.

Tabla 1. Análisis próximos y elementares de muestras. (Karatas, Olgun, y Akgun 2013); (b) (Maglinao, Capareda, y Nam 2015); (c) (Omar et al., 2017); y (d) Presente estudio

Característica		Tallo algodón ^(a)	CA ^(b)	TM ^(c)	CA ^(d)	TM ^(d)
Análisis próximo (wt, %)	Material Volátil %w	75,56	71,20	79,82	76.46	72.90
	Cenizas %w	6,61	13,02	2,08	6.08	8.62
	Carbono fijo %w	17,83	15,78	18,11	17.47	18.48
Análisis elemental (wt, %)	Carbón	49,16	39,30	43,20	39,30	39,95
	Hidrogeno	5,23	5,43	7,10	4,70	4,97
	Nitrógeno	0,93	1,44	0,60	1,21	0,60
	Azúfre	0,17	0,34	0,30	0,20	0,09
	Oxígeno	37,90	40,47	48,80	45,97	45,77

Fig. 2 Mezclas de biomasa residual. a) TM-CA 90-10 b) TM-CA 80-20 c) TM-CA 70-30 d) TM-CA 60-40

La Tabla 2 muestra en resumen los resultados para 23 ejecuciones experimentales de gasificación categorizando las relaciones de mezclas y la succión del sistema (FS). Se observa que la diferencia de medias para este último parámetro es aproximada a 0.07 MJ/Nm^3 la cual es menor al error de la variación para cada nivel ($\text{Error FS} = 0.09$) mientras que para el parámetro mezcla TM-CA las variaciones de las medias son superiores al error, en especial se destaca el caso de mezcla TM-CA 90-10. Se evidencian variaciones del poder calorífico para del gas entre 3.28 MJ/Nm^3 hasta 4.8 MJ/Nm^3 correspondientes a un 48% de diferencia. Las figuras 3,4 y 5 muestran la tendencia de las especies combustibles para cada una de las mezclas TM-CA. Es notable una concentración mayor de CO (ver Fig. 3) y disminución del CO_2 (Fig. 4) de forma dependiente maximizando el efecto contrario para la relación TM-CA es 90-10, esto indica una favorable condición de la reacción de gasificación con CO_2 (boudouard). Este efecto, incrementa el poder calórico del gas, tanto por la presencia de la especie combustible CO y la menor dilución de CO_2 en el gas. La Fig. 4 y la Fig. 5 muestran que el hidrogeno y el metano presentan una composición más estable (menor variabilidad) para las condiciones donde hay mezcla.

Tabla 2: Resultados experimentales para el valor medio del poder calorífico de gasificación (LHV) [MJ/Nm^3]

	Nivel	Casos	LHV grupo	Error estándar.	Límite Inferior	Límite Superior
TM-CA	100-0	9	3.55	0.08	3.39	3.71
	60-40	4	4.08	0.12	3.84	4.33
	70-30	3	3.80	0.13	3.52	4.08
	80-20	4	4.03	0.12	3.79	4.28
	90-10	3	4.73	0.13	4.46	5.02
FS	1	7	4.01	0.09	3.82	4.20
	2	9	4.03	0.08	3.87	4.20
	3	7	4.08	0.09	3.89	4.27

Fig. 3 Fracción de CO [%vol]

Fig. 4 Fracción de CO₂ [%vol] Fig. 5 Fracción de CH₄ [%vol] Fig. 6 Fracción de H₂ [%vol]

La Fig. 7 muestra el comportamiento del poder calorífico del gas obtenido para distintas mezclas, el máximo valor del LHV_{gas} de 4.8 MJ/Nm³ con una relación de mezcla TM-CA 90-10. Otro aspecto para destacar es la reducción de la variabilidad del proceso con respecto a la gasificación de TM-CA 100-0.

Fig. 7 Poder calorífico del gas LHV_{gas} [kJ/Nm³]

En contraste con otras investigaciones, se estudia la gasificación de tusa de maíz y residuos de cosecha de algodón respectivamente de forma independiente empleando aire como agente gasificante. Una comparación de la composición química de los gases y el LHV obtenidos en el presente trabajo se muestran en la Tabla 3 y la Fig. 8. Es apreciable que los promedios de mezclas determinados en esta investigación tienen una semejanza a los encontrados por (Omar et al., 2017) y (Maglinao et al., 2015). Un incremento por el efecto de la mezcla TM-CA 90-10 es notable sugiriendo que puede existir un efecto sinérgico asociado a la mezcla.

Tabla 3: Resumen de resultados y comparación con otros trabajos

Biomasa	LHV (MJ/Nm ³)	CO	H ₂	CH ₄	Referencia
Tusa de maíz	4,23	17,00	13,00	1,90	(Omar et al., 2017)
Residuos algodón	4,20	11,02	7,99	4,7	(Maglinao, Capareda, y Nam 2015)
Tusa de maíz 100%	3,94	17,03	11,40	1,60	Presente estudio
Mezcla 90-10	4,73	20,93	14,72	1,42	

El ANOVA aplicado a los resultados mostrado en la Tabla 4 para el modelo de mezcla, muestra que existe un efecto significativo de la variación de las mezclas TM-CA con respecto al poder calorífico con un Valor-P < 0.05. Esto valida la hipótesis confirmando que la mezcla genera un efecto de sinergia con respecto a una condición de mezcla de gases para las condiciones experimentales dadas

Tabla 4: Análisis de varianza para modelo de mezcla TM-CO. Basado el LHV_{gas}

Fuente	Suma de Cuadrados	Grad. Libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Mezcla (TM-CA)	3.445	4	0.861	55.12	0.000
B: FS	0.015	2	0.007	0.48	0.636
AB	0.710	8	0.089	5.68	0.012
RESIDUOS	0.125	8	0.016		
TOTAL	4.292	22

Fig. 8 Comparación de resultados con otros trabajos

Comprobado el efecto significativo de mezcla, se obtuvieron regresiones para describir el monóxido generado y el poder calorífico. Se realiza un nuevo ANOVA para cada uno de estos parámetros CO y LHV que se muestran en la Tabla 5 y la Tabla 6 respectivamente. Es notable que tanto el modelo de regresión como la interacción de tercer orden AB(A-B) son significativos con un P-Valor < 0.0001. Las regresiones en variable codificada se detallan en la ecuación 9 y 10, tanto para el CO como el LHV indican un valor positivo para la interacción de tercer orden AB(A-B) indicando una sinergia del en condición de mezcla.

Tabla 5: Análisis de varianza para la variable %CO

FDV	Suma de Cuadrados	Grad. Libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	95,96	3	31,990	10,76	0,000
Lineal	3,78	1	3,780	1,27	0,274
AB	2,73	1	2,730	0,92	0,351
AB(A-B)	89,45	1	89,450	30,10	<0.0001
Error	53,49	18	2,970		
Cor Total	149,45	21			

Tabla 6: Análisis de varianza para la variable LHV_{gas}

FDV	Suma de Cuadrados	Grad. Libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,50	3	1,17	26,8	<0.0001
Lineal	1,22	1	1,22	27,9	<0.0001
AB	0,01	1	0,01	0,1	0,77
AB(A-B)	2,28	1	2,28	52,3	<0.0001
Error	0,78	18	0,04		
Cor Total	4,28	21			

$$CO = 14.77A + 17B - 3.3AB + 66.5AB(A-B) \quad (9)$$

$$LHV_{gas} = 3.55A + 4.21B + 0.14AB + 10.67AB(A-B) \quad (10)$$

La mezcla de 90-10 de TM-CA presenta un efecto sinérgico con un aumento de 22.11 % del LHV y 37.1 % en la composición de CO respecto al valor promedio de mezcla. Estos valores tienen una similitud a la encontrada por (Inayat et al., 2016) donde exploran la cogasificación de OPF-CS empleando un gasificador de lecho fijo de corriente descendente determinando un incremento de 18% para el LHV y 16% para el CO. Según los balances de masa realizados con las ecuaciones 3 a la 8, aplicados a los resultados experimentales, se evidencia una notable mejora en el rendimiento de la conversión de carbono de la biomasa. La máxima conversión se estima en un 91% asociada a la condición de mezcla TM-CA 90-10 equivalente a una mejora en un 21% en la conversión de carbono (ver Fig. 9).

Fig. 9 Evaluación en la conversión de carbono en mezclas

DISCUSIÓN

Los trabajos de (Mullen et al., 2010) y (Capareda 2008) muestran que la pirolisis de la TM y CA respectivamente bajo las mismas condiciones, estos discrepan en los campos de carbono fijo y bioaceite generado. Con base en esto, la adición de CA en la mezcla puede generar una mayor disposición de carbono en la zona de reducción debido a que aporta más biochar durante la pirolisis, este mismo tiene dos efectos. El primero es que ayuda al craqueo de alquitranes generando un mayor campo de CO₂, el segundo efecto es que el incremento de biochar deja una mayor disponibilidad para la reacción de boudouard con el CO₂ proveniente de la oxidación y el mismo craqueo de alquitranes lo que permitiría un incremento en el rendimiento de conversión de carbono (ver Fig. 9) en la condición de mezcla TM-CA. La diferencia en la composición inorgánica de la biomasa y el aporte de volátiles presentes aportados por la TM, incrementan la reactividad y consigo el rendimiento de conversión del carbono como lo ha propuesto (Inayat et al., 2016).

La estabilidad de la cogasificación de TM-CA es otro de los factores favorables según los resultados de este trabajo. Es notable una reducción importante en la variabilidad del LHV y la composición en presencia de mezcla, posiblemente por la mejora del tránsito de la biomasa y un empaquetamiento más compacto generado por los espacios menores entre TM llenados con CA (Ver Fig. 9a) generando un lecho más denso, reduciendo con estas infiltraciones de oxígeno y evitando la generación de zonas de oxidación indeseadas (Widjaya et al., 2018).

Los efectos en el rendimiento de la conversión de carbono fueron cuantificados mediante un balance de masa evidenciando un incremento de este con respecto a la gasificación de TM. La gasificación downdraft de residuos de desmote de algodón al 100% no fue posible, además que otras investigaciones no reportan resultados en gasificadores de corriente descendente, posiblemente asociada a la geometría y características físicas de la materia prima que dificultan el arrastre de la biomasa en el cono de reacción causando empaquetamiento, esta experiencia es compartida con el autor (Sadaka 2013) quien lleva a cabo gasificación estable de residuos de algodón con necesidad de densificación.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones: 1) Una sinergia positiva durante la co-gasificación de TM-CA fue identificada, permitiendo alcanzar un mayor poder calorífico del syngas y rendimiento en la conversión de carbono en comparación con la predicción de mezcla ideal 2) El

uso del ANOVA es una herramienta rápida para la identificación de sinergias en la cogasificación de biomasa siempre que se aísle el efecto del ER mediante la variación de este para rangos normales de operación 3) Es posible el uso de la CA como materia prima en gasificadores de lecho de corriente descendente sin realización de tratamientos de densificación energética por medio de la cogasificación en proporciones reducidas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación – CIDI de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería a través del proyecto “generación de gas combustible enriquecido con hidrógeno. CDC TYGB”

REFERENCIAS

- Biagini, E., Barontini, F., y Tognotti, L. Development of a bi-equilibrium model for biomass gasification in a downdraft bed reactor. *Bioresource Technology*, 201, 156–165. (2016)
- Capareda, S. C. controlled pyrolysis of cotton gin trash. *Beltwide Cotton Conferences*, (3), 563–568. (2008)
- Hernández, J. J., Serrano, C., Pérez, J., y Horrillo, A. J. Velocidad de Combustión Laminar del Gas de Gasificación Calculada usando Diferentes Mecanismos de Reacción. *Informacion Tecnologica*, 15, 19–22. (2004)
- Inayat, M., Sulaiman, S. A., y Sanaullah, K. Effect of blending ratio on co-gasification performance of tropical plant-based biomass. *IET Conference Publications*, 2016 (CP688) (2016)
- Inayat, Muddasser, Sulaiman, S., Abd Jamil, A., Guangul, F., y Atnaw, S. The Study of Temperature Profile and Syngas Flare in Co-gasification of Biomass Feedstock in Throated Downdraft Gasifier. *Conference Paper Business Media Singapore 2015*. (2014)
- Karatas, H., Olgun, H., y Akgun, F. Experimental results of gasification of cotton stalk and hazelnut shell in a bubbling fluidized bed gasifier under air and steam atmospheres. 112, 494–501 (2013)
- Lu, Y. J., Jin, H., Guo, L. J., Zhang, X. M., Cao, C. Q., y Guo, X. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water with a fluidized bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21), 6066–6075 (2008)
- Maglinao, A. L., Capareda, S. C., y Nam, H. Fluidized bed gasification of high tonnage sorghum, cotton gin trash and beef cattle manure: Evaluation of synthesis gas production. *Energy Conversion and Management*, 105, 578–587. (2015)
- Mani, T., Mahinpey, N., y Murugan, P. Reaction kinetics and mass transfer studies of biomass char gasification with CO₂. *Chemical Engineering Science*, 66(1), 36–41. (2011).
- Mendoza, J. M., Bula, A. J., Rafael D, y Corredor, L. A. Análisis Exergético de la Gasificación de Biomasa. *Informacion Tecnologica*, 23, 85–96. (2012)
- Mullen, C. A., Boateng, A. A., Goldberg, N. M., Lima, I. M., Laird, D. A., y Hicks, K. B. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 67–74. (2010)
- Omar, M. M., Munir, A., Ahmad, M., y Tanveer, A. Downdraft gasifier structure and process improvement for high quality and quantity producer gas production. *Journal of the Energy Institute*, 1–11. (2017)
- Pérez, J. F., Melgar, A., y Benjumea, P. N. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, 96, 487–496. (2012)
- Sadaka, S. Gasification of raw and torrefied cotton gin wastes in an auger system. *Applied Engineering in Agriculture* (2013)
- Sulaiman, S. A., Roslan, R., Inayat, M., y Yasin Naz, M. Effect of blending ratio and catalyst loading on co-gasification of wood chips and coconut waste. *Journal of the Energy Institute*, 91(5), 779–785. (2017)
- Thunman, H., Niklasson, F., Johnsson, F., y Leckner, B. Composition of Volatile Gases and Thermochemical Properties of Wood for Modeling of Fixed or Fluidized Beds. *Energy y Fuels*, 15(6), 1488–1497. (2001)
- Udomsirichakorn, J., y Salam, P. A. Review of hydrogen-enriched gas production from steam gasification of biomass: The prospect of CaO-based chemical looping gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 565–(2014).
- Wei, J., Guo, Q., Gong, Y., Ding, L., y Yu, G. Synergistic effect on co-gasification reactivity of biomass-petroleum coke blended char. *Bioresource Technology*, 234, 33–39 (2017)
- Widjaya, E. R., Chen, G., Bowtell, L., y Hills, C. Gasification of non-woody biomass: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89 (September 2016), 184–193 (2018)
- Zhang, Y., y Zheng, Y. Co-gasification of coal and biomass in a fixed bed reactor with separate and mixed bed configurations. (2016)