



Ingeniería Mecánica

ISSN: 1815-5944

Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico

Lesme Jaén, René; Martillo Aseffe, José Alfonso; Oliva Ruiz, Luis Oscar
Estudio de la gasificación de la tusa del maíz para la generación de electricidad
Ingeniería Mecánica, vol. 23, núm. 3, e613, 2020, Septiembre-Diciembre
Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225165187008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto



Estudio de la gasificación de la tusa del maíz para la generación de electricidad

Study of the corn cob gasification of the for the electricity generation

René Lesme Jaén^{1,*}, José Alfonso Martillo Aseffe^{II}, Luis Oscar Oliva Ruiz^I

I. Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Santiago de Cuba, Cuba

II. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Facultad Técnica para el Desarrollo. Ecuador

* Autor de correspondencia: lesme@uo.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 30 de junio de 2020

Aceptado: 15 de agosto de 2020

Resumen

En éste trabajo se realizó un análisis energético-ambiental de un nuevo esquema para la cosecha del maíz en el Ecuador, que incluye la gasificación de la tusa para la generación de electricidad. A partir de evaluaciones experimentales del volumen de tusas por hectárea y su potencial energético, se desarrollan experimentos de gasificación para evaluar la producción de electricidad en un motor de combustión interna. Se elaboró un análisis de los impactos ambientales y una valoración económica de una planta de gasificación para cubrir la demanda de energía

eléctrica durante el desgranado del maíz y entregar energía eléctrica a la red. Como se resultado se obtuvo que una planta de gasificación de 40 kW puede generar 70,96 MWh anuales a un costo nivelado de la electricidad de 0,23 USD/kWh, con una reducción de 12,7 % de emisiones de gases de efecto invernadero comparado con la quema de la tusa a cielo abierto.

Palabras claves: tusa de maíz; gasificación; generación de electricidad.

Abstract

In this work, an energetic-environmental analysis of a new scheme for corn harvesting in Ecuador was carried out which includes the corn cobs gasification for the generation of electricity. From experimental evaluations of the volume of cobs per hectare and their energy potential, gasification experiments are developed to evaluate the production of electricity in an internal combustion engine. This was followed by an analysis of the environmental impacts and an economic valuation of a gasification plant to cover the demand for

electrical energy during corn shelling and deliver electrical energy to the grid. As a result, it was obtained that a 40 kW gasification plant can generate 70.96 MWh per year at a level cost of electricity of 0.23 USD / kWh, with a reduction of 12.7% in greenhouse gas emissions compared to burning the corn cob under the open sky.

Key words: corn cobs; gasification; electricity generation.

Cómo citar este artículo:

Lesme Jaén R, Martillo Aseffe JA, Oliva Ruiz LO. Estudio de la gasificación de la tusa del maíz para la generación de electricidad paralela. Ingeniería Mecánica. 2020;23(3):e613. ISSN 1815-5944.

Introducción

La generación y gerencia de los residuos constituyen dos temas prioritarios en las sociedades modernas, el abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores, contaminando el agua, el suelo, el aire, contribuyendo al cambio climático, afectando a los ecosistemas y a la salud humana. En el caso de la agricultura, una gestión adecuada de los residuos además contribuir al mejoramiento de los suelos, puede convertirlo en fuentes de alimento animal y de energía.

En Ecuador tradicionalmente los residuos de la cosecha de maíz (tallos, hojas, raíces) se acumulan en el suelo sirviendo como abono natural o se utilizan como alimento animal [1]. Sin embargo, en el caso de la tusa, que es un residuo del desgranado de la mazorca del maíz, se quema a cielo abierto, emitiéndose gran cantidad de sustancias que contaminan el agua, el suelo, el aire, contribuyendo al cambio climático, afectando los ecosistemas y a la salud humana [2].

Con el objetivo de disminuir el impacto ambiental que produce la quema de la tusa a cielo abierto y aprovechar su potencial energético, en éste trabajo se realiza un estudio energético-ambiental de la cosecha del maíz en el Ecuador, donde se valora el uso de la tusa como combustible bioenergético en tecnologías de gasificación,

considerando el uso del gas en un motor de combustión interna para cubrir la demanda electricidad de la máquina desgranadora de maíz y la entrega del excedente a la red nacional.

En el trabajo a partir de la estimación del potencial energético de la tusa, se realiza un análisis energético de su transformación en un combustible de mayor valor agregado (gas), así como un análisis del ciclo vida de su utilización en un motor de combustión interna para estimar el comportamiento de las variables energéticas-ambientales derivadas de su aprovechamiento energético.

En los últimos años se han desarrollado numerosos estudios para el uso de la tusa como combustible en gasificadores de biomasa y el uso del gas en cocinas domesticas [3], en turbinas a gas [4] y en motores de combustión interna para la generación de electricidad [5-7]. Estos estudios se han orientado a evaluar la calidad del gas generado, mejorar el diseño de los gasificadores y a desarrollar modelos de equilibrio para evaluar los efectos de la humedad y las características de la tusa en la composición del gas.

La novedad del presente trabajo con respecto a los anteriores radica en la integración de una planta de gasificación de la tusa en la cadena productiva del maíz y el análisis energético ambiental de dos esquemas productivos, sin y con aprovechamiento energético de la tusa.

Métodos y Materiales

En el trabajo se evaluó experimentalmente el volumen de tusa y su potencial energético y se desarrolló un estudio experimental de la gasificación de la tusa y la conversión del gas en electricidad para realizar una evaluación comparativa de los impactos ambientales de la producción de maíz sin y con aprovechamiento energético de la tusa. Finalmente se realiza una valoración económica de una planta de gasificación para la generación de electricidad.

Potencial energético de la tusa

Para estimar el potencial energético de la tusa inicialmente se determinó experimentalmente su coeficiente de residuos, relacionando el peso de la tusa con el peso del grano de maíz obtenido después del desgranado de la mazorca. Expresión 1 [8,9].

$$C_R = \frac{\text{Peso de la tusa}}{\text{Peso del maíz}} \quad (1)$$

Quedando definido el potencial energético de la tusa de maíz por hectárea se utilizó la siguiente expresión:

$$PE_t = CR_t \times R_{mha} \times LVH_b \quad (2)$$

Dónde:

PE_t . Potencial energético de la tusa por hectárea, GJ/ha

CR_t . Coeficiente de residuos de tusa, Kgr/Kgp

R_{mha} . Rendimiento de maíz por hectárea, ton/ha

LVH_b . Valor calórico bajo de la tusa, 17,40 MJ/kg MJ/kg. [6] [10]

Para la determinación del coeficiente de residuos y la estimación del potencial energético de la tusa se tomaron 1510 muestras de diferentes variedades de maíz. El número de muestra se determinó a través de la expresión 3, que se utiliza cuando no se conoce la población total [11].

$$N = \frac{Z^2 \pi (1 - \pi)}{E^2} \quad (3)$$

Dónde:

N . Número de muestra.

Z . Nivel de confianza. Se tomó el valor de 1,96 para un nivel de confianza de 95%

π . Probabilidad de éxito (0,5)

$(1-\pi)$. Probabilidad de fracaso (0,5)

E . Error máximo admisible (0,05)

Cada una de estas plantas fue separada en partes, tallos, hojas, raíces y tusa y relacionado el peso de la tusa con el peso del maíz desgranada de la mazorca. Se realizó un análisis de regresión para evaluar el coeficiente de correlación entre el peso de la tusa y el peso del grano y un análisis de varianza para determinar la desviación estándar.

Estudio experimental de la gasificación de la tusa

Para el estudio experimental de la gasificación de la tusa se llevaron a cabo seis corridas experimentales. Para los experimentos inicialmente la tusa fue secada naturalmente hasta una humedad de 10 %. Se utilizaron tusas con dimensiones 3-5 cm de largo y 2-2,5 cm, tal como se obtenía después de la separación del grano en la desgranadora de maíz se alimentaba al gasificador.

El gasificador utilizado es del tipo concurrente (*downdraft*) con alimentación de biomasa y el aire por la parte superior y salida del gas por la parte inferior. Para la realización de las pruebas experimentales inicialmente se efectúa el encendido del gasificador (cargado de tusa), luego se procede suministrar aire en exceso al gas con un ventilador centrífugo, para combustionar parte de la biomasa y calentar el reactor hasta alcanzar una temperatura de gasificación estable. Después de ajustado el régimen de gasificación durante un período de una hora se realizaron mediciones de temperatura, flujo de aire y gases [12].

Las muestras de gases resultantes de la gasificación de la tusa, tomadas a la salida del gasificador, para cada una de las condiciones experimentales fueron almacenadas y sometidas a un análisis cromatográfico (Norma ASTM D 1945-03 del 2010 *Standard test method for analysis of natural gas by gas chromatography* equivalente a la Norma ISO/ IEC 17.025: 2005).

Análisis comparativo de ciclo de vida

Se analizaron dos esquemas de la cosecha de maíz con el objetivo de evaluar los impactos ambientales. Las categorías de impactos evaluadas fueron: Compuestos inorgánicos respirables, agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad y eutrofización acuática, calentamiento global y consumo de energía no renovable para los dos escenarios considerados. En el primer esquema productivo de la cosecha de maíz, donde la tusa se quema a cielo abierto (incineración), figura 1, y un segundo esquema productivo donde durante la cosecha de maíz se procede a la gasificación de la tusa y el uso del gas para satisfacer la energía eléctrica consumida en la desgranadora de maíz y el excedente de electricidad se entrega a la red eléctrica nacional, figura 2.

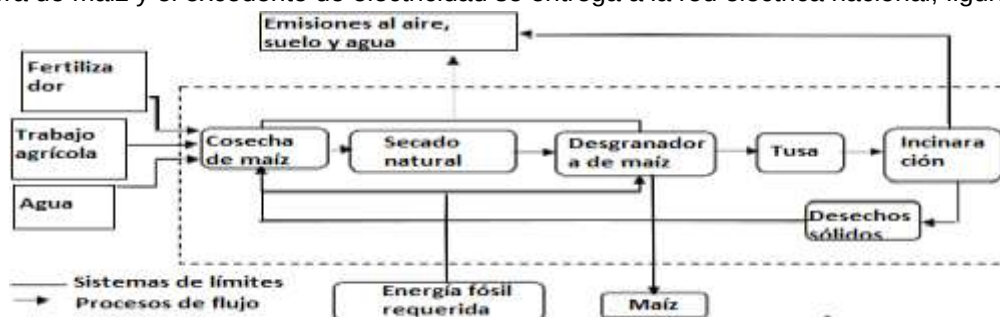


Fig. 1. Límites del esquema de producción de maíz sin aprovechamiento energético de la tusa.

Fuente: autores

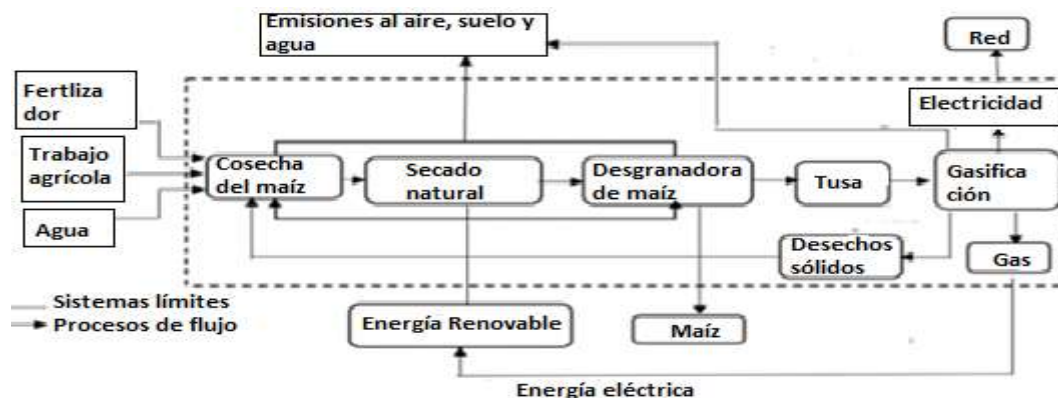


Fig. 2. Límites del esquema de producción de maíz por cosecha con aprovechamiento energético de la tusa

Fuente: autores

El análisis de ciclo de vida (ACV) se desarrolló teniendo en cuenta todas las actividades relacionadas con la cosecha, fertilización, trabajo agrícola, riego, cosecha, secado, desgranado, incineración y/o gasificación de la tusa, para lo cual los autores crearon un inventario de factores emisión relacionados con el uso de la gasolina y el gas en los motores de combustión interna, tabla 1.

Tabla 1. Factores de emisión promedio estandarizados de los dos escenarios [13-15].

Fuente: autores

Emisiones	Factores de Emisión (Kg/ton de maíz)		% de Reducción
	Figura 1	Figura 2	
CO ₂	329,31	14,390	95,63
NO _x	2,01	0,200	90,05
CO	106,15	7,370	93,06
HC +CH ₄	12,11	0,012	99,90
PM	1,70	0,006	99,65

Selección de la planta de gasificación

Para la selección de la planta de gasificación se utilizó la metodología desarrollada por [16] fundamentada en el cálculo de los costos nivelados de electricidad. Se analizaron 5 plantas de gasificación con potencia nominal de 5, 10, 20, 30 y 40 kW. Los costos de inversión de estas plantas y los costos anuales de mantenimiento ver en [17]. La potencia nominal de la planta se determinó por la expresión 4.

$$P_{nom} = \frac{P_{enr}}{8760 \cdot h} \quad (4)$$

Donde.

P_{enr} . Potencial energético por hectárea, MWh/ha

La energía eléctrica entregada por la planta, expresión 5, tiene en cuenta la energía eléctrica entregada a la red y a la consumida por la desgranadora de maíz. Se recomienda los siguientes valores: CUF = 0,25, a = 0,1 y b = 0,1 [16]

$$E_{elec} = P_{nom}(8760 - CUF)(1 - a)(1 - b) \quad (5)$$

Dónde:

P_{nom} . Potencia nominal de la planta, kW

CUF. Factor de utilización de capacidad.

a. Fracción de energía generada consumida por los equipos auxiliares.

b. Fracción de pérdidas eléctricas en la red de distribución local.

Los ingresos anuales de la planta se determinaron a partir de los siguientes conceptos: por sustitución de la gasolina en la desgranadora, expresión 6, por concepto de energía eléctrica entregada a la red, expresión 7, por concepto de bonos de carbono, expresión 8.

$$I_{gas} = CC_{des} \times P_{mh} \times 2 \times No. de ha \times P_{prg} \quad (6)$$

Donde:

CC_{des} . Consumo de combustible de la desgranadora, 0,37 galones/ton de maíz.

P_{mh} . Producción de maíz por hectárea, 4,86 ton/ha.

P_{prg} . Precio de la gasolina por galón, 1,48 USD/galón.

$$I_{red} = E_{ele}^{red} \times P_{red} \quad (7)$$

Donde:

E_{red} . Energía eléctrica entregada a la red, kWh

P_{red} . Precio de la electricidad, 0,1285USD/kWh

$$I_{CO2} = P_{maíz} \times No. ha \times 2 \times R_{CO2}^{eq} \times 22 \text{ USD/ton de } CO2 \quad (8)$$

Donde:

R_{CO2}^{eq} . Reducción de emisiones, 0,116 kg de CO₂/ton de maíz.

Los costos nivelados de la electricidad y el tiempo de recuperación de la inversión se determinaron por las ecuaciones 9 y 10 respectivamente.

$$CNE = \frac{C_{ti} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{am}}{(1+i)^t}}{\sum_{i=n}^n \frac{E_{ele}}{(1+i)^t}} \quad (9)$$

Donde:

n. Tiempo de vida operacional en años, 15 años

t. Vida útil de la planta, 20 años

i. Tasa de descuento, 8%

$$TIR = \left[\frac{\text{Período último con flujo acumulado negativo}}{\text{flujo acumulado negativo}} \right] + \frac{\left[\frac{\text{Valor absoluto del último flujo acumulado negativo}}{\text{Valor del flujo de caja (en el siguiente período)}} \right]}{\quad} \quad (10)$$

Resultados y Discusión

Coeficiente de residuos de la tusa

El valor medio del coeficiente de residuos de la tusa, obtenido por la ecuación 1 es 0,186 kilogramos de tusas por kilogramo de maíz seco cosechado, con una varianza de 0,005 de kilogramos de tusa / kilogramos de maíz y una desviación estándar de 0,07 kg de tusa/kilogramos de maíz, los valores muestran una dispersión mínima con respecto al valor medio obtenido, de forma tal que podemos afirmar que el coeficiente de residuos de la tusa es de $0,186 \pm 0,07$ kg de tusas/kg de maíz.

Utilizando el valor medio del coeficiente de residuos de la tusa y teniendo en cuenta que el rendimiento de maíz promedio en las regiones de Los Ríos y Guayas es de 4,86 ton/ha se pueden calcular que en estas regiones se pueden obtener 0,9 ton de tusas por hectárea.

Potencial energético de la tusa

Considerando que el poder calorífico bajo de la tusa es de 17,40 MJ/kg y utilizando la ecuación 2 se obtiene un potencial energético de la tusa de 15,72 GJ/ha por cosecha (4,37 MWh/ha por cosecha), este potencial equivale a 0,37 ton de petróleo.

Gasificación de la tusa. Características del gas y rendimiento del gasificador

Los resultados del análisis cromatográfico de las 6 muestras del gas resultante de la gasificación de la tusa de se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Por ciento en volumen de los componentes gas de la gasificación de la tusa en base húmeda. Fuente: autores

No	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂ O	LHV _g
1	19,05	4,18	24,58	0,52	10,27	39,82	0,99	0,60	6,35
2	29,96	1,21	18,21	0,62	12,33	35,89	1,13	0,65	8,37
3	24,52	2,29	58,63	3,47	1,88	8,19	0,09	0,95	3,27
4	30,66	1,97	16,57	0,79	8,34	40,15	0,70	0,81	6,72
5	8,50	1,88	36,55	3,08	1,61	46,65	0,25	1,49	1,66

LHV_g. Valor calórico bajo del gas (MJ/Nm³)

La elementos presentes en el gas, así como el por ciento en volumen y el poder calorífico del son similares a los reportados por otros autores [18,19], siendo su valor calórico bajo superior al valor límite inferior para ser usado en motores de combustión interna (3.00MJ/Nm³) [20]

Los resultados de estas pruebas fueron utilizados para evaluar la producción específica de gas y el rendimiento del gasificador a través modelo estequiométrico fundamentado en balances de masa y energía en el gasificador [12]. Los resultados de este modelo se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del gasificador. Fuente: autores

No	m _{bio} (kg/h)	m _{aire} (kg/h)	m _{gas} (kg/h)	G (Nm ³ /kg)	ER	η _r	η _c
1	15,92	13,61	27,07	1,48	0,21	0,55	0,61
2	14,39	16,03	22,04	1,56	0,22	0,72	0,78
3	11,55	13,99	24,95	2,17	0,22	0,41	0,48
4	22,26	14,48	35,31	1,56	0,13	0,56	0,62
5	22,05	14,84	36,11	1,23	0,13	0,28	0,33

Leyenda: m_{bio}. Consumo de biomasa, m_{aire}, Flujo de aire, m_{gas}. Gas producido, G. Producción específica de gas, ER: Relación de equivalencia, η_r. Rendimiento en frío, η_c. Rendimiento en caliente.

Potencial de generación de electricidad

A partir del potencial energético de la tusa de maíz por hectárea 15,72 GJ/ha por cosecha, 4,367 MWh/ha por cosecha. Utilizando los valores medios de producción específica de las (1,60 Nm³/kg de tusa) y valor calórico del gas (5,27 MJ/Nm³), reportados en la tabla 3, el coeficiente de residuos de tusa por kilogramo de maíz y la producción de maíz por hectárea se puede determinar un potencial energético del gas de 9,437GJ/ha (2,621 MWh/ha). Esto representa el 60,0 % del potencial energético de la tusa.

Una parte de la energía del gas producto de la gasificación de la tusa debe ser suministrado al motor de la desgranadora de maíz (Motor Vanguardia de 18 hp de potencia, modelo DGM-70 de fabricación ecuatoriana), el cual consume 1,40 litros gasolina regular/ton de maíz seco. Este consumo de gasolina equivale a un consumo de energía de 259,26 MJ/ha (0,072 MWh/ha), 1,65 % del potencial energético de la tusa. Considerando que la eficiencia promedio de un motor a gas es del 21.0%, entonces es necesario suministrar al motor 1234,57 MJ/ha (0,34 MW-h), 7,85 % del potencial energético de la tusa.

Después de satisfacer el consumo energético del motor de la cosechadora, la energía contenida en el gas es de 8,203 GJ/ha (2,278 MWh/ha), 52,18 % del potencial energético de la tusa, el gas puede ser suministrado a un grupo electrógeno para generar electricidad a la red nacional. Teniendo en cuenta la eficiencia del motor (21 %) es posible entregar a la red 1722,63MJ/ha (0,479MWh/ha) por cosecha, valor que representa el 10,94 % del

potencial energético de la tusa. La Fig. 3 corresponde a un diagrama de Sankey, en el cual se muestra la distribución de la densidad energética derivada de la producción de residuos de tusa de maíz y su aprovechamiento energético mediante un sistema de gasificación y un motor de combustión interna.

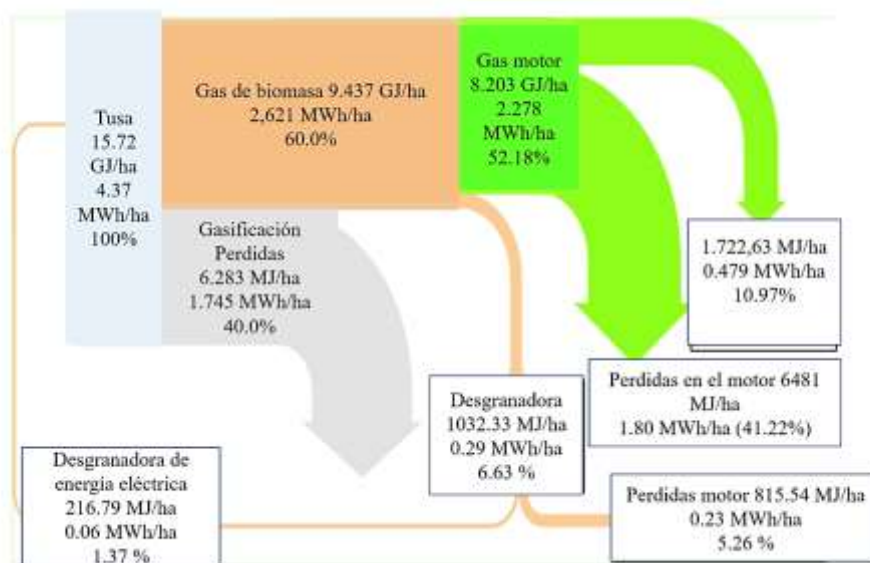


Fig. 3. Diagrama de Sankey de aprovechamiento energético de los residuos de tusa.
Fuente: autores

Estos potenciales energéticos representados en la figura 3 pueden ser expresados en toneladas de maíz producidas considerando que se producen 4.86 ton de maíz por hectáreas. De esta forma podemos concluir que es en el segundo esquema productivo es posible entregar a la red 0,10 MWh/ton de maíz producido.

Análisis comparativo de ciclo de vida de los dos escenarios

El ACV comparativo de la cadena productiva de maíz considerando los dos escenarios, puede observarse una significativa reducción de impactos ambientales en el caso de la gasificación de la tusa (Case_Gsf), nuevo escenario, con respecto al caso de referencia, figura 4, principalmente en la categoría de agotamiento de la capa de ozono, calentamiento global y consumo de recursos no renovables, donde se produce una reducción de impacto de 19,4 %, 12,7 % y 23,5 %, respectivamente.

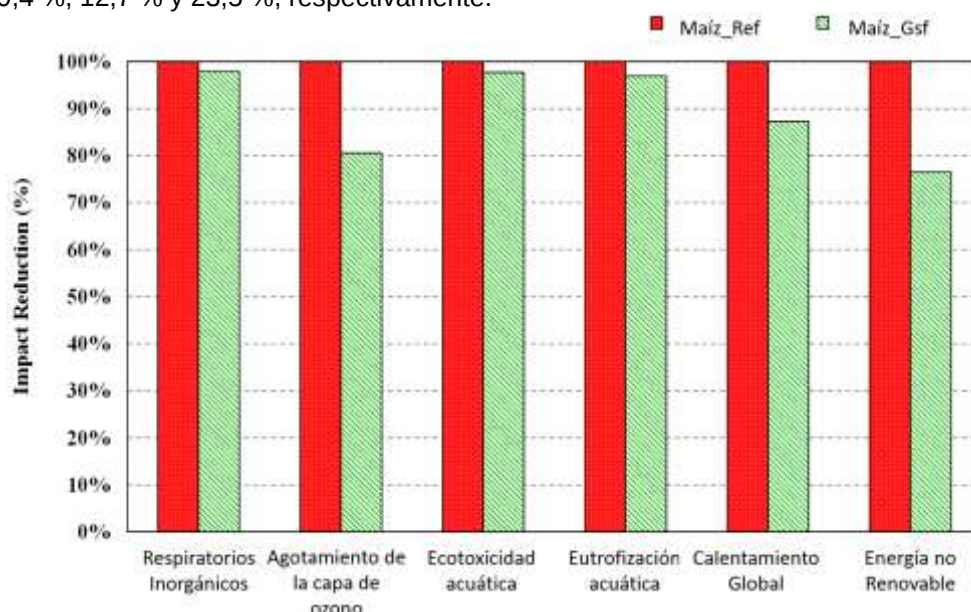


Fig. 4. Contribución de las categorías de impacto en el desempeño ambiental de los escenarios evaluados. Fuente: autores

En el caso de las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono y calentamiento global, esta reducción de impacto ambiental está relacionada directamente con la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, producto de la sustitución de energía fósil (combustión de gasolina) por energía renovable, en donde

las emisiones de atmosféricas de origen fósil en el caso de referencia, pasan a ser emisiones biogénicas o de carácter neutro para el caso de gasificación de residuos de tusa y generación eléctrica.

Entretanto, los excedentes de energía eléctrica eventualmente podrían ser distribuidos en la red eléctrica nacional de Ecuador, lo cual conduce a la incorporación de una energía limpia y renovable al sistema eléctrico de distribución y consecuentemente una cantidad equivalente de energía fósil sería desplazada, con lo cual también serían desplazadas las fuentes no renovables de energía involucradas.

En el caso de la categorías de impacto asociada a los compuestos inorgánicos respirables, ecotoxicidad y eutrofización acuática, fue observada una reducción de impacto menor (2,0% – 3,5%), en donde las emisiones de NO_x, SO_x, CO, entre otros, para ambos escenarios fueron bajas, representando beneficios mínimos para estas categorías de impacto en particular.

La evaluación del calentamiento global mostró una reducción del índice específico de emisión de gases de efecto invernadero de 913 kg CO₂ equivalente / ton maíz a 797 kg CO₂ equivalente / ton maíz, tal y como se muestra en la figura 5.

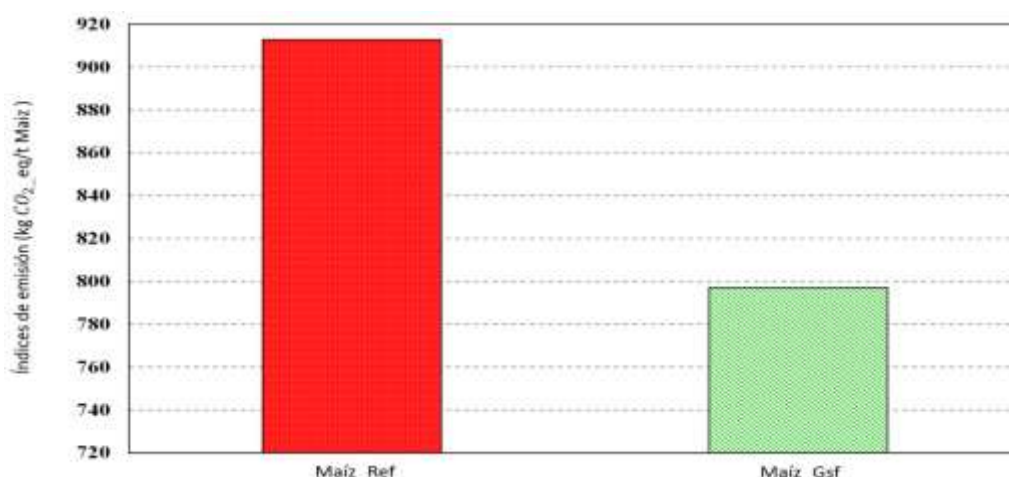


Fig. 5. Emisiones específicas de CO₂ equivalente para los escenarios evaluados.

Fuente: autores

Fue observada también una reducción de 1369 MJ/ t maíz en el consumo de energía no renovable en el escenario de la gasificación de la tusa, figura 6.

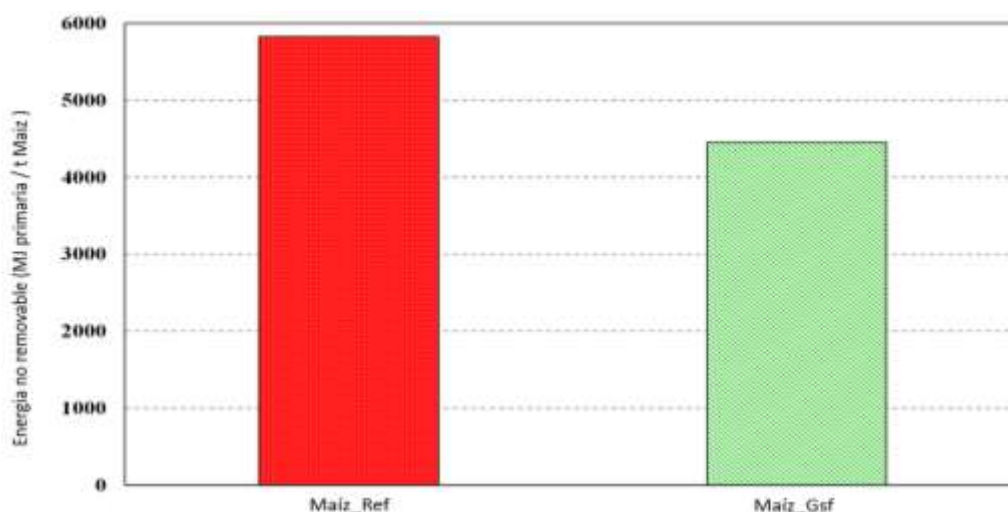


Fig. 6. Consumo de energía no renovable para los escenarios evaluados.

Fuente: autores

Planta de gasificación

Considerando el potencial energético de generación de electricidad por hectárea como la suma de la demanda de electricidad de la desgranadora más la energía eléctrica entregada a la red por el número de cosechas 1,538 MWh/ha, figura 3, es posible evaluar energía eléctrica anual entregada por las plantas de gasificación de 5, 10, 20, 30 y 40 kW y los ingresos anuales y los costos nivelados de la electricidad detallados en las expresiones 4 a la 8. En la tabla 4 se presentan los resultados.

Tabla 4. Energía eléctrica entregada, costos nivelados de electricidad e ingresos anuales.
Fuente: autores

No.	5 kW	10 kW	20 kW	30 kW	40 kW
E_{elec}^{des}, MWh	3,60	7.20	14,40	21,60	28,80
E_{elec}^{red}, MWh	5,30	10.54	21,08	31,62	42,16
E_{elec}, MWh	8.87	17.74	35,48	53,22	70,96
$CNE, USD / kWh$	0,53	0,37	0,26	0,42	0,23
I_{gas}, USD	159,68	319,36	638,72	695,77	1277,24
I_{red}, USD	681,0	1354,39	2708,78	3826,76	5417,56
I_{CO_2}, USD	744,26	1488,32	2796,60	4464,98	5953,31

El análisis de flujo de caja permitió determinar a través de la expresión. 9 que una planta de gasificación de 5 kW se recupera en 18,8 años, una de 10kW en 9.7años, una planta de 20 kW en 6,5 años y la planta de gasificación de 40kW se recuperaría en 5,5 años. Estos valores están en función del precio de la gasolina y el de la electricidad en Ecuador.

Conclusiones

El potencial energético de la tusa en las provincias de Los Ríos y Guayas calculado a través del valor medio del coeficiente de residuos de tusa es de 15,72 GJ/ha. Utilizando el gas de la tusa en un motor de combustión interna es posible, después de la sustitución de gasolina en el motor de la desgranadora de maíz, entregar a la red nacional un potencial energético de 1722,63 MJ/ha (0,479 MWh/ha), equivalente a 0,10 MWh/tonelada de maíz producido por cosecha.

En el nuevo esquema productivo para el cultivo del maíz con el uso de la tusa como combustible muestran una reducción superior al 95 % de los factores de emisión específicos de gases de efecto invernadero y particulados y una reducción de 12,7% de emisiones de CO₂ equivalente /ton de maíz

Una planta de gasificación de 40 kW para la gasificación de la tusa de 240,00 hectáreas sembradas de maíz puede generar 70,96 MWh anuales a un costo nivelado de la electricidad de 0,23 USD/kWh, produciendo ingresos totales por concepto de sustitución de gasolina en la desgranadora, ventas de electricidad a la red y bonos de carbono de 12648, 31 USD anuales, con un tiempo de recuperación de 5,5 años.

Agradecimientos

Agradecemos al laboratorio de termodinámica de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo (ESPOCH) y al laboratorio de análisis instrumental del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito.

Referencias

1. Sánchez A, Torres E, Estupiñán L, et al. Valoración nutritiva del rastrojo de Zea mays y Oryza sativa para la alimentación de ovinos en el trópico ecuatoriano. Rev. Amazónica Ciencia y Tecnología. 2015;4(3):235-249.
2. Coelho P, Costa M. Combustão. Portugal: Edições Orion; 2007.
3. Suhartono B, Prasetyo D, Ikrimah A. Synthetic gas (syngas) production in downdraft corn cob gasifier and its application as fuel using conventional domestic stove. Rev. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016;11(8):200-15.
4. Guteša B, Valera-Medina A, Syredb N, et al. Fuel quality impact analysis for practical implementation of corn COB gasification gas in conventional gas turbine power plants. Rev. Biomass and Bioenergy. 2019;122:221–230
5. Panote W, Chun Che F. A study on a corn cob gasifier engine-generator for electricity generation in Northern Thailand using the equilibrium Model. In: Conference Power System Technology. Proceedings International Conference Power Con; 2015, Kunming, China (Citado el 18 de noviembre 2019) Disponible en: http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/14132/1/corn_cob_gasifier_engine-generator.pdf
6. De Kama J, Morey R, Tiffany D. Biomass Integrated Gasification Combined Cycle for heat and power at ethanol plants. Rev. Energy Conversion and Management. 2009;50:1682–1690.
7. Field J, Tanger P, Shackley P, et al. Agricultural residue gasification for low-cost, low-carbon decentralized power: An empirical case study in Cambodia. Rev. Applied Energy. 2016;177:612–624
8. Brosowski A, Thrän D, Mantau U, et al. A review of biomass potential and current utilization –Status quo for 93 biogenic wastes and residues in Germany. Rev. Biomass and Bioenergy. 2016;95:257-272
9. Suzuki K, Tsuji N, Shirai Y, et al. Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. Rev. Biomass and Bioenergy. 2017;97:149-154
10. Martillo A, Lesme R, Oliva O. Estimación del potencial energético de la tusa en la provincia de Los Ríos y Guayas, Ecuador. Centro Azúcar. 2020;47:11-21.
11. Webster AL. Estadística aplicada a los negocios y a la economía. 3ra ed. Colombia: Editorial Irwin McGraw-Hill; 2000.
12. Martillo A, Lesme R, Oliva O, et al. Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraf. Rev. Tecnología Química. 2019;39:455-470.
13. Jesper A, Torbenkvist J, Henriksen U, et al. CO Emissions from Gas Engines Operating on Biomass Producer Gas. In: Proceedings of 2da World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy and Industry. Rome, Italy; 2004 (Citado

- el 18 de noviembre del 2018). Disponible en: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/3263245/rome2004_v2-64.pdf
14. Quintero M, Moncada A. Contaminación y control de las quemas agrícolas. *Rev. Región y sociedad*. 2008;XX(43):1-24.
 15. Tipanluisa E, Remache P, Ayabacay R, et al. Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina. Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades. *Rev. Información Tecnológica*. 2017;28(1):3-12.
 16. Kumar T, Iyer R, Chandra T. A financial evaluation of biomass-gasifier-based power generation in India. *Rev. Bioresource Technology*. 1997(61):53-59.
 17. Nounia M, Mullickb C, Kandpal C. Biomass gasifier projects for decentralized power supply in India: A financial evaluation. *Rev. Energy Policy*. 2007;(35):1373–1385.
 18. Muhammad O, Anjum M, Manzoor A, et al. Downdraft gasifier structure and process improvement for high quality and quantity producer gas production. *Rev. Journal of the Energy Institute*. 2017;(30):1-11.
 19. Biagini E, Barontin F, Tognotti L. Gasification of agricultural residues in a demonstrative plant: Corn cobs. *Rev. Bioresource Technology*. 2014;(173):110–116.
 20. Lesme R, Garcia L, Oliva O, et al. Biomass Gasification for Power Generation Internal Combustion Engines. *Process Efficiency. Rev. Tecnología Química*. 2016;XXXVI(2):133-144.
 21. .

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

René Lesme Jaén. <https://orcid.org/0000-0001-7274-0153>

Participó en el diseño de las tareas de investigación realizadas, procesamiento de datos experimentales, así como, en la elaboración, revisión y aprobación final del artículo.

José Alfonso Martillo Aseffe. <https://orcid.org/0000-0003-3620-7874>

Recolección de datos de la cosecha de maíz, ejecución de trabajos experimentales, revisión y aprobación final del artículo.

Luis Oscar Oliva Ruíz. <https://orcid.org/0000-0002-1140-0363>

Participó en la ejecución de trabajos experimentales, revisión y aprobación final del artículo.