PASOS HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PROPUESTA DE **ENERGÍA SOSTENIBLE**

Recopilación de artículos científicos
Tercer Congreso de Energía Sostenible

ISBN Versión digital 978-958-57711-2-3

2016

PASOS HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PROPUESTA DE ENERGÍA SOSTENIBLE

**Recopilación de artículos científicos,
Tercer Congreso de Energía Sostenible**

Pasos hacia la construcción de una propuesta de energía sostenible

Recopilación de artículos científicos Tercer Congreso de Energía Sostenible

Congreso de Energía Sostenible, 2016
Bogotá, Colombia
www.congresoenergiasostenible.org

© Todos los derechos reservados.

Se permite la reproducción total
o parcial de esta obra citando la fuente.

Comite científico

Dr. Iván Cabeza Rojas
Universidad Santo Tomás

M.Sc. Jair Alexander Ladino
Universidad del Valle

Dr. Mario Hernández
Universidad EAN.

M.Sc. Manuel Alejandro Mayorga
Universidad ECCI

Dr. Dionisio Humberto Malagón
Universidad Santo Tomás

Dr. Angélica Santis
Universidad Cooperativa

Dr. Carlos Forero
Universidad Jorge Tadeo Lozano

Dr. Libardo Mendoza
Universidad ECCI

M.Sc. Edwin Forero
Universidad Santo Tomás

Dr. Paola Acevedo
Universidad Cooperativa

M.Sc. Diana Fajardo
Universidad el Bosque

Dr. Henry Cortés
Universidad Nacional de Colombia

Comité Organizador

Dr. Dionisio Humberto Malagón
Universidad Santo Tomás

M.Sc. Carlos Garzón
Universidad ECCI

M.Sc. Diana Catalina Moreno
Universidad ECCI

M.Sc. Diana Fajardo
Universidad el Bosque

M.Sc. Luis Devia
SENA

Carlos Pachón
Organización Akkuaippa

Diseño de portada

Carlos E. Pachón
Asociación Akuaippa

Diagramación

Carlos E. Pachón
Elizabeth Abril Pulido
Asociación Akuaippa

Corrección de estilo

M.Sc. Katerine Tinoco

ISBN versión digital

978-958-57711-2-3

Editorial

Asociación Akuaippa
Bogotá, Colombia

CONTENIDO

PAG.	TÍTULO
9	PRÓLOGO
11	ANÁLISIS ENERGÉTICO DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS ELABORADOS A PARTIR DE BIOMASA AGROINDUSTRIAL Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA.
17	PRODUCCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE DURABILIDAD MECÁNICAS DE PELLETS
22	ANÁLISIS EXERGoeCONÓMICO DE LA GASIFICACIÓN DE TUSA DE MAÍZ CON VAPOR DE AGUA COMO AGENTE GASIFICANTE, INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA
28	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE METANIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS, ESTIÉRCOL DE CERDO Y DE LA INDUSTRIA CACAOTERA EN COLOMBIA
34	ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS TIPOS DE BIOMASA PARA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN BRASIL
40	OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES POR MEDIO DE HIDRÓLISIS SUBCRÍTICA EN UNA UNIDAD DE LABORATORIO SEMICONTINUA, A PARTIR DE LA HOJA DE MAÍZ (ZEA MAYS).
48	ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESAMIENTO DE LLANTAS USADAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN CONDICIONES DE ALTA PRESIÓN Y TEMPERATURA
54	DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DE SEDIMENTOS (HAZE) GENERADOS EN EL BIODIESEL
59	PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE BIOETANOL EN BOGOTÁ A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS SÓLIDOS
64	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA TUSA DE MAÍZ BLANCO (Zea mays L.) CON POTENCIAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN
69	OBTENCIÓN DE COMPOSITES FeNbMo SOPORTADOS EN AEROGELs DE CARBON PARA ELIMINACION DE AZUFRE DE LOS COMBUSTIBLES
75	EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ESTIÉRCOL BOVINO
82	PROPUESTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SAN ANDRÉS ISLA CON BIOMASA RESIDUAL PORCINA
87	VALORIZACIÓN ENERGETICA DE LOS RESIDUOS PRODUCIDOS EN LA INDUSTRIA DEL CAFÉ: OBTENCIÓN DE BIOETANOL
93	OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE MEZCLAS DE ACEITE USADO DE COCINA Y ACEITE DE HIGUERILLA
99	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA BIOMASA SÓLIDA RESIDUAL EN COLOMBIA POTENCIALMENTE APROVECHABLE EN PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN TERMOQUÍMICA

106	POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO Y TÉCNICO DE BIOMASA RESIDUAL DISPONIBLE EN COLOMBIA PARA APROVECHAMIENTO EN PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN TERMOQUÍMICA
112	PELLETS DE BIOMASA: UNA ALTERNATIVA DE ENERGÍA TOTALMENTE VIABLE

ENERGÍAS ALTERNATIVAS

119	DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EFICIENTE Y ASEQUIBLE PARA ILUMINACIÓN PÚBLICA DE ZONAS NO-INTERCONECTADAS.
124	PRODUCCIÓN FOTOCATALITICA DE HIDRÓGENO BASADA EN EL MINERAL ARENA NEGRA COMO SEMICONDUCTOR (Estudio Preliminar)
132	ANÁLISIS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES CONTAMINANTES DEBIDO A LA ADICION DE OXIHIDRÓGENO A LA MEZCLA CARBURANTE EN UN MOTOR DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA A GASOLINA
137	ILUMINACIÓN LED PARA AUTOSERVICIOS CON FUENTES DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA
143	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE GAS OXIHIDRÓGENO (HHO) EN LA MEZCLA AIRE/COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA
149	CONSTRUCCIÓN DE UN RESERVORIO PARA EL ALMACENAMIENTO DE BIOGAS GENERADO POR UN BIODIGESTOR
154	IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE POTENCIALES ENERGÉTICOS: HÍDRICO, SOLAR Y BIOMASA, EN HACIENDA LA COSMOPOLITANA
162	SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CONTROL INTELIGENTE

EFICIENCIA Y AUDITORÍA ENERGÉTICA

168	EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD: METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS UNIVERSITARIOS
173	MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA PRODUCTIVO MIPYME EN FUNCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO
179	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL PROCESO DE TEÑIDO DE LA TINTORERÍA ASITEX S.A.
185	ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA PLANTA TERMoelectrica PILOTO CON SOBRECALENTAMIENTO DE VAPOR

PRÓLOGO

La posibilidad de aprovechar nuevas fuentes de energía para disminuir el impacto que tiene este sector sobre el ambiente se ha convertido en una necesidad para el sector académico e industrial. Distintos esfuerzos se hacen para alcanzar este objetivo. Aunque el sector de las Energías Alternativas ha venido tomando impulso en los últimos años, todavía se tiene un largo camino por recorrer. Durante el año 2016 se realizó el III Congreso Internacional de Energía Sostenible que permitió la presentación de diversos trabajos asociados con la generación, distribución y utilización de la energía. En este libro se tiene la compilación de los trabajos presentados durante este Evento. Como en las versiones anteriores, el aporte presentado supera las expectativas de quienes constituyen el comité organizador, y plantea nuevos desafíos para la organización del siguiente Congreso.

Es importante reconocer el aporte que se hace en la utilización de la Energía Solar, en el aprovechamiento de la biomasa y la generación de nuevos combustibles. También la presencia de nuevas generaciones que construyen con su imaginación y conocimiento nuevos escenarios para la construcción de procesos sostenibles. Esto se ve estimulado en Colombia por la Promulgación de la Ley 1715 de 2014 que impulsa la generación de nuevas formas de energía, y contribuye con exenciones tributarias a que el sector empresarial de un salto a la aplicación de energías alternativas. Seguramente que la reglamentación de esta ley contribuirá enormemente con el aumento de la eficiencia energética que garanticen un cambio sostenible a nivel nacional y global.

Finalmente, expresamos un agradecimiento a los autores que contribuyeron con sus trabajos para la edición del presente libro. Son ellos quienes finalmente han realizado un ingente esfuerzo para presentar sus aportes a la comunidad académica y empresarial, son ellos los responsables de un esfuerzo continuo y permanente por construir un cambio en los procesos industriales. A ellos nuestro reconocimiento y admiración por tan loable esfuerzo.

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS ELABORADOS A PARTIR DE BIOMASA AGROINDUSTRIAL Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA.

Padilla, Elías Ricardo D¹
Oquendo-López, Jhon Luís²
Mendoza-Fandiño, Jorge Mario³
González- Doria, Yahir Enrique⁴

^{1,2} Universidad de Córdoba, Semillero de Investigación SIMEC
^{3,4} Universidad de Córdoba, Grupo de Investigación I.C.T
³jorgemmf@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

En el departamento de Córdoba la actividad agrícola genera gran cantidad de biomasa, que junto con los yacimientos de carbón mineral, son una fuente potencial de energía para el departamento. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el rendimiento energético de pellet fabricados a partir de mezclas entre fibra de coco, algodón y carbón mineral. Los materiales fueron caracterizados mediante análisis químico inmediato, contenido de azufre y poder calorífico superior-PCS con tres repeticiones para cada test. Fueron producidos nueve tipos de pellets, calculada la densidad de los materiales antes y después de la producción y evaluadas las mezclas con el mayor potencial energético para ser usadas como biocombustible. Los resultados mostraron que la fibra de coco y algodón presentaron PCS de 16,77 y 17,79 MJ/Kg, contenido de cenizas de 4,93% y 5,92% y contenido azufre de 0,12% y 0,2% respectivamente. Se encontró que el carbón mineral presentó el mayor contenido de azufre entre los materiales de 1,55% evidenciando el problema ambiental de este combustible, sin embargo, con las mezclas biomasa-carbón se logró disminuir el contenido de azufre sin afectar significativamente PCS.

Palabras claves: Biomasa, Poder calorífico superior, Pellets, Biocombustible.

INTRODUCCIÓN

Los impactos causados al medio ambiente por el uso excesivo de combustibles fósiles motivaron la investigación, desarrollo e implementación de nuevas fuentes de energía menos contaminantes [1]. El problema ambiental junto con la escasez del petróleo y la creciente demanda de energía, aumentan la necesidad de diversificar la matriz energética, en Colombia con la expedición de la ley 1715 de 2014, se espera impulsar el desarrollo de las fuentes no convencionales de energía e integrarlas en el sistema energético nacional [2].

Desde una perspectiva global considerando el impacto al medio ambiente, la seguridad energética y el suministro de energía, la biomasa se está convirtiendo en el principal candidato entre las fuentes de energía renovable para su implementación a corto plazo en muchas regiones [3]. La biomasa por detrás del carbón y el petróleo, se considera como la tercera fuente de energía más grande del mundo [4], en Colombia, el Plan Energético Nacional 2006-2025 proyecta un panorama favorable tanto en el consumo de energía renovable como en la capacidad de producción, se cita como ejemplo el incremento en la producción de alcohol a partir de materias primas diferentes a las convencionales, dentro de las que se encuentran, el maíz, yuca, sorgo, remolacha o cualquier otro tipo de biomasa [5].

La biomasa también puede ser aprovechada para su uso energético en forma de pellets o briquetas, es decir, conglomerados cilíndricos de residuos lignocelulósicos. Este sector en Colombia aún se desarrolla con lentitud y hay poca información sobre las empresas que producen este tipo de producto para el mercado nacional. El País a pesar de ser poco industrializado en la fabricación de pellets/briquetas, según la Revista M&M se destaca la planta Villa Don Bosco ubicada en Santander de Quilichao, al norte del departamento del Cauca, la cual tiene una producción de 1.560 toneladas de briquetas por año con destino a Suiza [6], [7].

Recientemente varios estudios fueron realizados en el área de bioenergía con el objetivo de caracterizar y evaluar el potencial energético de residuos agroindustriales, incluyendo además estudios sobre la reglamentación de las energías renovables en Colombia, las investigaciones realizadas mostraron que existen leyes e incentivos, principalmente de carácter tributario, que promueven el desarrollo de estas energías [8], [9], [10]. Trabajos enfocados en densificar biomasa con carbón ya fueron realizados principalmente utilizando

aserrín, huesco de palma de aceite y cascara de cacao [11], [12].

En el departamento de Córdoba la economía se basa principalmente en actividades ganaderas y agrícolas, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, en Córdoba para el año de 2014 se registró una producción de 68.596 toneladas de algodón [13] y 29.949 toneladas de coco para el año de 2013 [14]. Aunque que no se cuenta con datos específicos que permitan calcular la producción de residuos durante las cosechas de estos cultivos, la unidad de planeación minero energético los clasifica como cultivos de interés energético [15]. Por otra parte también existen en el departamento yacimientos carboníferos, como los de Puerto Libertador con una reserva estimada en 381 Mt [15].

A diferencia del carbón mineral, actualmente existen pocas investigaciones en la región que fomenten el uso de los residuos agroindustriales como fuente de energía. Estos tienen baja densidad y alta humedad en comparación con el carbón mineral, lo cual causa baja eficiencia energética y problemas de manipulación, transporte y almacenamiento [16]. Sin embargo presentan menos contenido de azufre que el carbón mineral [11]. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue mezclar fibra de coco, algodón y carbón mineral, para producir pellets y evaluar las mezclas con el mayor potencial energético para ser usadas como biocombustible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los residuos de coco y algodón, fueron recolectados en las vías que comunican a la ciudad de Montería con Cereté y en las instalaciones de la Universidad de Córdoba-Colombia, respectivamente. El carbón mineral fue suministrado por la mina la "Guacamaya" de Puerto Libertador Córdoba. Inicialmente, fue determinado el contenido de humedad de los materiales utilizando una estufa con circulación de aire a 110 °C, y luego triturados para obtener la fibra y reducir la granulometría del carbón mineral.

Análisis químico y poder calorífico superior PCS.

El análisis químico inmediato consistió en determinar el contenido de material volátil, ceniza, y carbono fijo de los materiales siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D5865 [17]. Por otra parte mediante aná-

lisis elemental se determinó el contenido de azufre de los materiales, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D3176 [18]. El poder calorífico superior fue determinado para los materiales y sus mezclas, utilizando una bomba calorimétrica marca C 200-Ika y siguiendo la norma ASTM D5865 [19], todos los ensayos fueron realizados con tres repeticiones.

Preparación de las mezclas y fabricación de pellets

En la tabla. 1 se muestra el arreglo experimental que fue seguido para elaborar las mezclas. Este fue desarrollado basado en un modelo de mezclas utilizando el programa Design Expert 9, en su versión de prueba.

Tabla 1. Arreglo experimental

Materiales	Tratamientos								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Fibra de Coco (%)	90	0	70	0	65	20	55	20	40
Fibra de Algodón (%)	0	90	0	70	20	65	20	55	40
Carbón mineral (%)	10	10	30	30	15	15	25	25	20

Siguiendo el orden de los tratamientos se mezclaron manualmente la fibra de coco, algodón y el carbón mineral, según los porcentajes indicados en el arreglo experimental. Una vez preparadas las mezclas, fue calculada la densidad a granel, siguiendo una adaptación de la norma UNE-EN 15103 [20], el resultado se expresó como la masa de material contenida en un volumen de 1000 ml.

Se procedió entonces a fabricar los nueve tipos de pellets, utilizando una pelletizadora tipo rodillo marca Gemco modelo ZLSP D- 200B equipada con una matriz plana perforada. Cada tratamiento después de mezclado fue suministrado a la peletizadora por la tolva, los rodillos de la máquina presionan el material contra la matriz que se mantiene en movimiento logrando así la producción continua de pellets con diámetro nominal de 4 mm. Finalmente cada tipo de pellets fue identificado con la referencia correspondiente, secados al sol durante tres días, y almacenados en sacos plásticos.

De cada tipo de pellets fue seleccionada una muestra al azar y calculada la densidad aparente, siguiendo una adaptación de la norma UNE-EN 17828 [21], el resultado se expresó como la masa de pellets contenida en un volumen de 1000 ml. Con estos resultados y los de poder calorífico se calculó la densidad energética

de cada tipo de pellets, como el producto de la densidad aparente con el poder calorífico superior.

Análisis energético de las mezclas biomasa-carbón.

En esta etapa utilizando diagramas de superficie respuesta (MSR) se evaluó el comportamiento del PCS, en las mezclas biomasa-carbón, utilizando el software Design Expert en su versión de prueba. También se optimizaron las concentraciones de los materiales, con el fin de encontrar una mezcla con máximo porcentaje de coco-algodón y mínimo porcentaje de carbón utilizado que presentara a la vez máximo PCS y contenido de carbono fijo, y mínimo contenido de cenizas-azufre entre los límites estudiados. El Análisis estadísticos de los resultados fue realizado en el programa Statgraphics versión 2.15.05. La estadística comparó los datos obtenidos mediante el método de homogeneidad Bartlett, varianza ANOVA y Tukey. Para todos los análisis fue considerado un nivel de confianza de 95% ($\alpha=0,05$) [22].

Resultados y Análisis de resultados

El tamaño de partícula, el contenido de humedad en la materia prima y el precalentamiento durante la densificación afecta la densidad de los pellets [23]. Los resultados mostraron que el contenido de humedad en la fibra de coco, algodón y carbón mineral fue de 13,12%, 10,78%, y 11,52% respectivamente. Todos los materiales presentaron tamaños de partículas inferiores a 2,00 mm después de la trituración. El contenido de humedad adecuado para fabricar pellets varía entre 10% a 15% [24], y el tamaño de partícula recomendado por el manual de la peletizadora utilizada era inferior a 4,00 mm, por tanto los materiales contenían humedad y tamaños de partículas adecuados para la producción de pellets.

Los resultados del análisis químico y PCS se presentan en la tabla. 2 se puede observar que el carbón mineral presentó lógicamente mejores propiedades energéticas que las fibras utilizadas. Estas presentaron un contenido de cenizas más alto que el carbón mineral, lo cual posiblemente influyó negativamente en el PCS, ya que el contenido de ceniza no contribuye con el calor global liberado durante la combustión [25]. Con relación al contenido de volátiles, la fibra de algodón presentó el mayor contenido entre los materiales, seguido por la fibra de coco y por último el carbón mineral.

Tabla 2. Análisis químico y PCS de los materiales (base seca)

Materiales	Volátiles (%m)	Cenizas (%m)	Carbono fijo (%m)	Azufre (%m)	PCS (MJ/Kg)
Fibra de coco	71,32	4,93	23,74	0,12	16,77
Fibra de algodón	77,33	5,92	16,74	0,19	17,79
Carbón Mineral	49,39	3,97	46,64	1,55	23,91

Comparando los resultados obtenidos en este estudio con los encontrados en la literatura mostrados en la Tabla. 3. se puede notar que algunos valores son similares, Pineda et al. [26] Caracterizó el carbón mineral proveniente de Puerto Libertador- Córdoba, sus muestras presentaron un contenido de azufre de 2,34%, indicando que la elevada cantidad de azufre presente en el carbón mineral de esa región es un factor característico de este combustible.

Tabla 3. Análisis químico y PCS para materiales de referencia (base seca)

Materiales	Volátiles (%m)	Cenizas (%m)	Carbono fijo (%m)	Azufre (%m)	PCS (MJ/Kg)	Referencia
Fibra de coco	77,19	0,71	22,10	-	20,50	[27]
Fibra de algodón	72,80	6,61	20,59	0,2	16,90	
Carbón Mineral	40,20	5,50	40,10	2,34	24,03	[26]

El carbón mineral comparado con las fibras presentó mayor PCS, por lo cual este combustible es normalmente en la industria. Aunque, también mostró un menor contenido de cenizas de 3,69% comparado con el 4,93% y 5,92% de la fibra de coco y algodón respectivamente, el alto contenido de azufre encontrado evidencia la problemática ambiental que presenta este combustible. Por el contrario los residuos de coco y algodón presentaron contenidos de azufre casi despreciables demostrando las ventajas ambientales de tipo de combustibles.

Los resultados de la densidad a granel y aparente de las mezclas se presentan en la figura 1. Se puede observar que los materias mezclados presentaron densidad a granel entre 0,23 y 0,35 g/cm3 y después de compactados en la forma de pellets presentaron densidad aparente entre 0,91 y 1,16 g/cm3 indicando un aumento significativo en esta característica, lo cual es importante ya que significa mayor energía acumulada por unidad de volumen.

Figura. 1 (a) Densidad a granel y (b) Densidad aparente de las mezclas

Se observó que a medida que aumentó el porcentaje de carbón en los pellets también aumento la densidad aparente. Los mayores valores de densidades aparentes fueron encontrados en los tratamientos compuestos por 70% biomasa y 30% carbón, M3 y M4 presentaron densidades de 1,12 y 1,16 g/cm3 respectivamente mientras que las menores densidades fueron presentadas por los tratamientos compuestos por 90% biomasa y 10% carbón. Según Torres [28] los pellets generalmente presentan una densidad entre 1,0 a 1,2 g/cm3 dependiendo del material que los compone, en este estudio solo se encontraron dos tratamientos con densidad aparente inferior a 1,0 g/cm3, estos fueron M1 y M2 con 0,92 y 0,97 g/cm3 respectivamente.

La figura 3. Muestra los resultados de PCS en las mezclas y su influencia en la densidad energética. Los tratamientos fueron organizados de menor a mayor concentración de carbón mineral, se observó que el PCS vario entre 17,32 a 19,27 MJ/Kg y aumentó con la concentración de carbón mineral de los tratamientos. M1 con una composición de 90% fibra de coco y 10 % de carbón mineral fue el tratamiento que presentó el menor PCS. Puede ser observado claramente la tendencia ascendente de la densidad energética a medida que aumenta PCS en los tratamientos. El PCS y la densidad energética son vistos como factores importantes al momento de escoger un material como combustible, los pellets con mayor contenido de carbón mineral lógicamente tuvieron mayor PCS y por tanto mayor densidad energética.

Figura. 3 PCS y su influencia en la densidad energética.

Los resultados de análisis energético de las mezclas biomasa-carbón se presentan en la figura 4. Se observó que los mejores resultados de PCS en las mezclas se encontraron en las mayores concentraciones de carbón y de algodón utilizadas (zona roja). Al optimizar las concentraciones de los materiales entre los límites estudiados se encontraron tres resultados que cumplían las condiciones solicitadas, de los cuales la mezcla compuesta por 51,80% de coco, 35,70% de Algodón y 12,50% de Carbón mineral, fue el primer resultados con PCS de 17,83MJ/Kg, contenido de carbono fijo de 24,09%, contenido de cenizas de 5,17% y contenido de azufre total de 0,33%.

Figura. 4 Superficie respuesta del PCS.

CONCLUSIONES

Fue posible la fabricación de pellets utilizando residuos de coco, algodón y carbón mineral sin la adición de aglutinante. Los resultados de análisis químico inmediato, elemental y PCS en las materiales mostraron

que el carbón mineral presentó lógicamente mejores propiedades energéticas que la biomasa, sin embargo aunque el carbón presente menor contenido de cenizas y mayor PCS que los residuos estudiados, el porcentaje de azufre encontrado en este combustible fue superior al 1,5% permitido en la costa atlántica, evidenciado la problemática ambiental del carbón mineral del departamento de Córdoba. El análisis energético de las mezclas mostró que puede ser ofrecida una mezcla biomasa-carbón como alternativa para mitigar los problemas ambientales del carbón mineral y con mejor potencial energético que los residuos agroindustriales puros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Centro de Investigación para el Desarrollo e Innovación C.I.D.I, a la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería, a la Universidad de Córdoba y al aporte de recursos del convenio 753 de 2013 "Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe" BPIN N° 2012000100026 (Gobernación de Córdoba-UPB Montería).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. G. Spiro and W. M. Stigliani, *Química Ambiental*. 2a ed, São Paulo: Person Prentice Hall, 2009.
- [2] ACER, "noticias: ley 1715 del 13 de mayo de 2014", [Online], disponible en: <https://goo.gl/ZtGh1K>
- [3] D. T. Liang, R. Yan, and D. H. Lee, "Introduction to the special section of energy & fuels", *Energ. Fuels.*, vol. 22, no. 1, pp. 1-1, Jan. 2008.
- [4] D. W. Bapat, S.V. Kulkarni, and V. P. Bhandarkar, "Design and operating experience on fluidized bed boiler burning biomass fuels with high alkali ash", in *Proc. 14th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion*, New York, 1997, pp. 1-19.
- [5] UPME. "Plan Energético Nacional 2006-2025-Contexto y Estrategias", [Online], disponible en: <https://goo.gl/IFhkXZ>
- [6] J. A. Barrera-Otálora, "Briquetas: La Mejor Forma de Reutilizar Los Residuos Forestales", *Rev. M&M*, no. 69, sep. 2010.

- [7] J. L. Ordóñez-Jiménez, "Pellets: Energía Limpia con Buen futuro", *Rev. M&M*, no. 83, Marzo 2014.
- [8] D. Muñoz-Muñoz, A. J. Pantoja-Matta, and M. F. Cuatin-Guarín, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorefinería". *Rev. Bio. Agro*, vol. 12, no. 2, pp. 10-19, Mayo 2014.
- [9] D. Muñoz-Muñoz, M. F. Cuatin, and A. J. Pantoja, "Potencial energético de residuos agroindustriales del departamento del cauca, a partir del poder calorífico inferior". *Rev. Bio. Agro*, vol. 11 no. 2, pp. 156-163, Ene. 2013.
- [10] D. C. O. Motta, J. S. Aguilar, and E. H. Aguirre, "Una revisión a la Reglamentación e incentivos de las energías renovables en Colombia". *Rev. Fac. Cienc. Econ.*, Vol. XX, no. 2, pp. 55-67, Dic. 2012.
- [11] C. A. Forero-Núñez, J. Jochum, and F. E. Sierra, "Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets", *Ing. Invest*, vol. 35, no. 1, pp. 17-23, Apr. 2015.
- [12] N. Arzola, A. Gómez, and S. Rincón, "The effects of moisture content, particle size and binding agent content on oil palm shell pellet quality parameters". *Ing. Invest.*, vol. 32 no. 1, pp. 24-29, Apr. 2012.
- [13] DANE, "Encuesta Nacional Agropecuaria", [Online], disponible en: <http://goo.gl/qfWgqi>
- [14] MinCIT, "Perfil económico: Departamento de Córdoba, año base 2013", Oficina de Estudios Económicos Montería, 2013, [Online], disponible en: <http://goo.gl/gLHDxU>
- [15] UPME, "La cadena del carbón en Colombia", 2005, [Online], disponible en: <https://goo.gl/1YCW6k>
- [16] F. F. Felfli, J. M. Mesa P, J. D. Rocha, D. Filippetto, C. A. Luengo, and W. A. Pippo, "Biomass briquetting and its perspectives in Brazil". *Biomass. Bioenerg.*, vol. 35, no. 1, pp. 236-242, Jan. 2011.
- [17] *Standard practice for proximate analysis of coal and coke*, ASTM Standards, D3172 – 13, 2013.
- [18] *Standard practice for ultimate analysis of coal and Coke*, ASTM Standards, D3176 – 15, 2015
- [19] *Standard test method for gross calorific value of coal and coke*, ASTM, D5865 – 13, 2013.
- [20] *Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel*, UNE-EN 15103, 2010.
- [21] *Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad*, UNE-EN 17828, 2015.
- [22] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. 7th ed, New York: John Wiley and Sons, 2008, pp. 21-54.
- [23] N. Kaliyan, and R. V. Morey, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 33, no. 3, pp. 337-359, March 2009.
- [24] A. K. Tripathi, P. V. R. Iyer, and T. C. Kandpal, "A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 14, no. 5, pp. 479-488, May 1998.
- [25] B. Jenkins, L. L. Baxter, and T. R. Miles, "Combustion properties of biomass", *Fuel. Process. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 17-46, March 1998.
- [26] G. A. C. Pineda, M. A. M. Godoy, and C. X. M. Herrera, "Influencia de la concentración de hierro y pH iniciales en un proceso de biodesulfurización de carbón—ensayos a nivel de laboratorio", *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 13, no. 2, pp. 199-209, Dic. 2011.
- [27] C. Yin, "Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses", *Fuel*, vol. 90, no.3, pp. 1128-1132, March 2011.
- [28] L. Ortiz Torres, "Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España", Universidad de Vigo, Campus A Xunqueira, 2008, pp. 107-123.

PRODUCCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE DURABILIDAD MECÁNICAS DE PELLETS

Padilla, Elías Ricardo D¹
Oquendo-Lopez, Jhon Luís²
Mendoza-Fandiño, Jorge Mario³
Lancheros-Suarez, Valery José⁴

^{1,2}Universidad de Córdoba, Semillero de Investigación SIMEC
^{3,4}Universidad de Córdoba, Grupo de Investigación I.C.T
³jorgemmf@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

Los residuos agrícolas y forestales son una fuente potencial de energía, sin embargo debido a su baja densidad generalmente presentan problemas durante el procesamiento. La densificación de los residuos puede ser una solución a este inconveniente, una vez que esta técnica genera productos más densos, facilitando su almacenamiento, manipulación y transporte. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la calidad de pellets fabricados a partir de fibra de coco y algodón. Los materiales fueron caracterizados con respecto al contenido de humedad y tamaño de partículas. Fueron elaborados 12 tipos de pellets con adición de aglomerante (de maíz, yuca o plátano) en porcentajes entre 10% y 30% y dos tipos de pellets sin la adición de aglomerantes. Se determinó el índice de durabilidad (PDI) para todos los tratamientos. Los resultados mostraron que todos los tratamientos tuvieron PDI superior a 97,95% y no hubo diferencias estadísticas significativas entre los tipos de aglomerante utilizados. Por tanto fue posible la producción de pellets con buena calidad sin uso de aglomerantes, a partir de fibra de coco y algodón con tamaños de partícula inferiores a 2 mm (10 mesh) y contenido de humedad entre 10 y 15%.

Palabras claves: Biomasa, Pellets, Fuentes de energía, Durabilidad.

INTRODUCCIÓN

La producción de pellets se inició en América del Norte en la segunda mitad de la década de 1970 y más tarde se extendió a Europa y otras partes del mundo [1]. Hoy en día, los pellets se producen y utilizan a escala mundial, pero su uso se concentra en los países desarrollados. La densificación es un proceso por el cual partículas sueltas, tales como aserrín o residuos agroindustriales triturados se comprimen mecánicamente con o sin el uso de un aglomerante para formar productos más compactos, llamados pellets o briquetas [2].

Esta técnica permite aumentar la densidad de los residuos mejorando su manipulación y transporte, por otro lado con el aumento de la densidad aumenta también la energía por unidad de volumen [3], por lo tanto, en los últimos años la densificación de residuos viene siendo utilizada principalmente en los países en desarrollo para aprovechar de forma más eficiente residuos agrícolas y forestes como fuente de energía [2], [4], [5], [6]. La mayoría de la biomasa densificada producida en países en desarrollo tiene forma de briquetas y se utilizan directamente para sustituir la leña o el carbón [7].

El ensayo de durabilidad es un método utilizado por la industria para medir y controlar la calidad de pellets y briquetas. Estos productos tienden a quebrarse cuando son manipulados, el ensayo simula ese proceso y prevé el porcentaje de finos generados, conocido como índice de durabilidad. Por tanto la durabilidad puede ser interpretada como la capacidad de pellets y briquetas para resistir la manipulación y el transporte [8]. El tamaño de partícula, el contenido de humedad en la materia prima y el precalentamiento durante la densificación afecta la densidad y durabilidad de los pellets [9].

El índice de durabilidad o resistencia a la abrasión puede ser definido como la relación entre la masa que queda después de separadas las partículas finas quebradas sobre la muestra total utilizada en el ensayo [9]. Existen normas estandarizadas para calcular el índice de durabilidad (PDI), o simplemente porcentaje de durabilidad, el procedimiento más usado en la industria de los Estados Unidos se detalla en la norma estándar de la Sociedad Americana de ingenieros agrícolas y biológicos ASABE 269.4 [10], [11]. Sin embargo otras normas también son ampliamente utilizadas en diversos estudios [12], [13], [14].

Grandes cantidades de residuos agrícolas se generan en las actividades agrícolas y en las industrias

de procesamiento de productos agrícolas, en el departamento de Córdoba-Colombia la economía se basa principalmente en actividades ganaderas y agrícolas, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, para el año de 2014 se registró una producción de 68.596 tonelada de algodón y de 29.949 toneladas de coco en el año de 2013 [15], [16]. En este contexto el objetivo del presente trabajo fue producir pellets a partir de fibra de coco y algodón, mezclados con diferentes concentraciones de aglomerantes (de maíz, yuca y plátano) y evaluar la durabilidad de los pellets usando la norma estándar ASABE 269.4.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los residuos de coco y algodón, fueron recolectados en las vías que comunican a la ciudad de Montería con Cereté y en las instalaciones de la Universidad de Córdoba-Colombia, respectivamente. Inicialmente, fue determinado el contenido de humedad de los materiales utilizando una estufa con circulación de aire a 110 °C, luego los materiales fueron triturados para obtener la fibra y realizada la clasificación de tamaño utilizando 100 gramos de cada material triturado y seco, siguiendo el método de tamices estandarizados y la norma ASTM E11 [17]. Durante el procedimiento se usaron tamices de 20, 40, 60 y 100 mesh y una tamizadora marca D&R, RF SL-305S para agitar la muestra durante 15 min.

Preparación de las mezclas y fabricación de pellets

En la tabla. 1 se muestra el arreglo experimental que fue seguido para elaborar las mezclas. Éste fue desarrollado basado en un modelo de mezclas combinado con factores categóricos utilizando el programa Design Expert 9, en su versión de prueba. Siguiendo el orden de la tabla. 1 se mezcló manualmente la fibra de coco con el tipo de aglomerante correspondiente (de yuca, plátano o maíz) según los porcentajes indicados. Repitiendo el mismo procedimiento se mezclaron aparte la fibra de algodón con los tres tipos de aglomerante.

Tabla 1. Arreglo experimental

Ref. Pellets con fibra de coco	Ref. Pellets con fibra de algodón	Biomasa (%)	Aglomerante (%)	Tipo de aglomerante
R1	E1	90	10	Yuca
R2	E2	70	30	Yuca

Ref. Pellets con fibra de coco	Ref. Pellets con fibra de algodón	Biomasa (%)	Aglomerante (%)	Tipo de aglomerante
R3	E3	90	10	Plátano
R4	E4	70	30	Plátano
R5	E5	90	10	Maíz
R6	E6	70	30	Maíz
R7	E7	100	0	-

Una vez preparadas las mezclas se procedió entonces a fabricar los 12 tipos de pellets con aglomerante, utilizando una peletizadora tipo rodillo marca Gemco modelo ZLSP D- 200B equipada con una matriz plana perforada. Cada tratamiento después de mezclado fue suministrado a la pelletizadora por la tolva, los rodillos de la máquina presionan el material contra la matriz que se mantiene en movimiento logrando así la producción continua de los pellets con diámetro nominal de 4 mm. Finalmente cada tipo de pellets fue identificado con la referencia correspondiente, secados al sol durante tres días y almacenados en sacos plásticos. Siguiendo el mismo procedimiento de fabricación, también fueron elaboraron por separado otros dos tipos de pellets, compuestos por 100% fibra de coco y 100% fibra de algodón sin adición de aglomerantes (R7 y E7, respectivamente)

Ensayo de durabilidad

Para evaluar la calidad de los pellets fabricados se utilizó el ensayo de durabilidad. Se determinó el PDI en todos los tipo de pellets, con el propósito de comparar los resultados entre sí y verificar la influencia de los aglomerantes en está propiedad mecánica. El ensayo de durabilidad fue realizado con la adaptación de la norma estándar ASABE 269.4, utilizando un prototipo friabilómetro, equipado con una caja rectangular de dimensiones interiores de 30,5 x 30,5 x 12,7 cm y un motor controlado por PLC.

Primero fue pesada una muestra de 250 g de pellets, esta se colocó dentro de la caja del equipo y fue sometida a volteó durante 10 minutos a 50 rpm. Al terminar un total de 500 vueltas se separaron los finos generados utilizando un tamiz con abertura 0.8 veces el diámetros de los pellets (3,2 mm para este caso) y finalmente se calculó el PDI en porcentaje como la relación entre la masa retenida en el tamiz y la masa total utilizada en el ensayo [11]. El Análisis estadísticos de los resultados fue realizado en el programa Statgraphics versión 2.15.05. La estadística comparó los datos obtenidos mediante el método de homogeneidad Bartlett, varianza ANOVA y Tukey. Para todos los análisis fue considerado un nivel de confianza de 95% ($\alpha=0,05$) [18].

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El contenido de humedad necesario para peletización depende de la tecnología y la materia prima utilizada [19], los efectos del contenido de humedad de la materia prima en la peletización y la calidad de pellets, ha sido el objetivo de varios estudios, en general el contenido de humedad adecuado para fabricar pellets varía entre 5% a 10% para residuos de madera, mientras que para residuos agrícolas varia entre 10% a 20%, [20], [21], [22], [23]. Los resultados en este estudio mostraron que el contenido de humedad de la fibra de coco y algodón, fueron de 13,12% y 10,78%, respectivamente. Por lo tanto, se puede decir que los materiales contenían humedad en el rango recomendando por la literatura.

Los tamaños de partículas adecuados para la producción de pellets, también dependen del proceso de densificación utilizado, estudios indican que la fricción entre la matriz y los rodillos de las peletizadora aumenta con la disminución del tamaño de partículas, y se sugieren utilizar tamaños inferiores a 5 mm, sin embargo partículas finas (menores a 0,5 mm) necesitarían de un agente de unión o aglomerante para mejorar la calidad de los pellets [9], [21], [24].

Los materiales después de la trituración mostraron tamaños adecuados para la producción de pellets debido a que el equipamiento sugería utilizar tamaños inferiores a 4 mm. La distribución granulométrica se muestra en la figura. 1 donde se puede observar que la mayor concentración de fibra de algodón quedó retenida en el tamiz numero 20 mesh, lo que indica que el 76% de las partículas de este material presentaron tamaños entre 2 y 0.85 mm. La fibra de coco presentó una distribución de tamaño más uniformemente, con la mayor concentración retenida en el tamiz de 60 mesh.

Figura. 1 Clasificación granulométrica de la materia prima (base seca)

Durabilidad mecánica (PDI)

La tabla. 2 muestra los resultados del PDI, para los pellets sin aglomerantes y la figura. 2 muestra los resultados de PDI para los pellets con aglomerantes. Comparando el PDI de los pellets de fibra de coco con aglomerantes y el PDI de R7, el aumento más representativo fue de 1,27% al utilizar el aglomerante de maíz (tratamiento R5). Similarmente al comparar el PDI de los pellets de algodón con aglomerantes y el PDI de E7, el aumento fue de 1,03% también al utilizar 10% de aglomerante de maíz (tratamiento E5). A partir de los resultados se puede afirmar que no se presentaron aumentos significativos en el PDI que justifiquen la peletización utilizando los tipos de aglomerantes estudiados. Posiblemente la fricción en el proceso de peletización aumentó la temperatura de la biomasa, lo cual mejoró el proceso de densificación [9], [26].

Tabla 2. PDI pellets de biomasa sin aglomerante

Ref. Pellets	PDI
R7	98,27 ± 0,07
E7	97,99 ± 0,51

La durabilidad mecánica es uno de los parámetros más importantes en la producción de pellets, de acuerdo con la norma prEN 14961-2 el valor mínimo para el PDI es de 97,5% para las clases A1 y A2 [19]. Los resultados fueron superiores a el valor mínimo y similares a los encontrados en la literatura, Arzola et al. Encontraron valores medios de PDI entre 91,02% y 98,91% para pellets de cuesco de palma de aceite misturados con melaza como aglomerante en porcentajes entre 15% y 25% [25]. Filbakk et al. Produjeron pellets de madera con PDI entre 92,0% y 96,0% y humedad entre 7,0% y 12,5%.

Figura 2. PDI para pellets de biomasa con aglomerante.

La prueba estadística ANOVA permitió confirmar que no hubo una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0% entre las

medias de los datos, esto significa que no hubo diferencia significativa en el PDI al cambiar de aglomerante usando fibra de coco o residuos de algodón como biomasa. El estadístico de Bartlett mostró que no hubo diferencia estadística entre las desviaciones estándar.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que los residuos de coco y algodón pueden ser utilizados en la fabricación de pellets, los resultados evidencian que pellets elaborados con estas biomásas presentan índice de durabilidad o resistencia a abrasión superior a 97,95% indicando buena calidad. Los resultados mostraron que no se presentaron aumentos significativos en el PDI para pellets fabricados con aglomerantes (de yuca, plátano o maíz) independientemente de la biomasa utilizada por tanto fue posible producir pellets con buena calidad sin la necesidad de utilizar aglomerante, usando fibra de coco o residuos de algodón con tamaños de partícula inferiores a 2 mm (10 mesh) y contenido de humedad entre 10% y 15%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Centro de Investigación para el Desarrollo e Innovación C.I.D.I, a la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería, a la Universidad de Córdoba y al aporte de recursos del convenio 753 de 2013 “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe” BPIN N° 2012000100026 (Gobernación de Córdoba-UPB Montería).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] S. C. Bhattacharya, “Biomass Energy and Densification: A global review with emphasis on developing countries”, in *Proc. 1st World. Conf. Pellets.*, Stockholm, 2002, pp. 1-17.

[2] L. Wamukonya, and B. Jenkins, “Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya”. *Biomass. Bioenerg.*, vol. 8, no 3, pp. 175-179, Nov. 1995.

[3] D. A. Silva, G. T. Nakashima, J. L. Barros, A. L. Da Roz, and F. M. Yamaji, “Caracterização de biomassas

para a briquetagem". *Floresta*, vol. 45, no. 4, pp. 713-722, Dez. 2015.

[4] M. J. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworowski, M. Krzyżaniak, P. Gulczyński, and M. Mleczeek, "Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass". *Renew. Energ.*, vol. 57, pp. 20-26, Sept. 2013.

[5] F. F. Felfli, J. M. Mesa P, J. D. Rocha, D. Filippetto, C. A. Luengo, and W. A. Pippo, "Biomass briquetting and its perspectives in Brazil". *Biomass. Bioenerg.*, vol. 35, no. 1, pp. 236-242, Jan. 2011.

[6] A. K. Tripathi, P. V. R. Iyer, and T. C. Kandpal, "A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 14, no. 5, pp. 479-488, May 1998.

[7] J. Vinterbäck, "Pellets 2002: the first world conference on pellets", *Biomass Bioenerg*, vol. 27, no. 6, pp. 513-520, Dec. 2004.

[8] H. S. Kambo, and A. Dutta, "Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization", *Appl. Energ.*, vol. 135, pp. 182-191, Dec. 2014.

[9] N. Kaliyan, and R. V. Morey, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products", *Biomass. Bioenerg*, vol. 33, no. 3, pp. 337-359, March 2009.

[10] T. Winowski, "Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best?", *Feed. Manage.*, vol. 49, no. 1, pp.23-26, 1998.

[11] *Cubes, pellets, and crumbles – definitions and methods for determining density, durability, and moisture content*, ASABE Standards, S269.4, 2003.

[12] E. R. D. Padilla, I. C. S. Pires, F. M. Yamaji, and M. M. Fandiño, "Produção e Caracterização Físico-Mecânica de Briquetes de Fibra de Coco e Palha de Cana-de-Açúcar". *RVq*, to be published.

[13] S. Yaman, M. Şahan, H. Haykiri-Acma, K. Şeşen, and S. Küçükbayrak, "Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste", *Fuel. Process. Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 23-31, Oct. 2000.

[14] I. Obernberger, and G. Thek, "Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior". *Biomass. Bioenergy*, vol. 27 no. 6, pp. 653-669, Dec. 2004.

[15] DANE, "Encuesta Nacional Agropecuaria", [Online], disponible en: <http://goo.gl/qfWgqi>

[16] MinCIT, "Perfil económico: Departamento de Córdoba, año base 2013", Oficina de Estudios Económicos Montería, 2013, [Online], disponible en: <http://goo.gl/gLHDxU>

[17] *Standard specification for Woven wire test sieve cloth and test sieves*, ASTM Standards, E11 – 13, 2013.

[18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. 7th ed, New York: John Wiley and Sons, 2008, pp. 21-54.

[19] I. Obernberger, and G. Thek, *The Pellet Handbook - The Production and Thermal Utilisation of Biomass Pellets*. 1st ed, London: Earthscan, 2010, pp. 57.

[20] D. Andreiko, and J. Grochowicz, "Effect of the moisture content on compression energy and strength characteristic of lupine briquettes", *J. Food Eng.*, vol. 83, no 1, pp. 116-120, Nov. 2007.

[21] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi, J. Ahrenfeldt, and U. B. Henriksen, "Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions", *Fuel*, vol. 90, no. 11, pp. 3285-3290, Nov. 2011.

[22] T. Filbakk, G. Skjevraak, O. Hoibo, J. Dibdiakova, and R. Jirjis, "The influence of storage and drying methods for scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters," *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 5, pp. 871-878, May 2011.

[23] M. T. Carone, A. Pantaleo, and A. Pellerano, "Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 35, no 1, pp. 402-410, Jan 2011.

[24] W. Stelte, A. R. Sanadi, L. Shang, J. K. Holm, J. Ahrenfeldt, and U. B. Henriksen, "Recent developments in biomass pelletization—A review", *BioResources*, vol. 7, no. 3, pp. 4451-4490, Aug. 2012.

[25] N. Arzola, A. Gómez, and S. Rincón, "The effects of moisture content, particle size and binding agent content on oil palm shell pellet quality parameters". *Ingeniería e Investigación*, vol. 32 no. 1, pp. 24-29, Apr. 2012.

[26] S.Yaman, M. Sahanşahan, H. Haykiri-Acma, K. Şeşen, and S. Küçükbayrak, "Fuel briquettes from biomass–lignite blends". *Fuel. Process. Technol.*, vol. 72, no. 1, pp.1-8, Aug. 2001.

ANÁLISIS EXERGEOECONÓMICO DE LA GASIFICACIÓN DE TUSA DE MAÍZ CON VAPOR DE AGUA COMO AGENTE GASIFICANTE, INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA

Rhenals Julio, Jesús¹
Torres Montes, Mario¹
Mendoza Fandiño, Jorge¹
Gómez Vásquez, Rafael²

¹ Universidad de Córdoba, Grupo de investigación Ingeniería, Ciencia y Tecnología.
² Universidad Pontificia Bolivariana Montería, Grupo de investigación OPUREB.
jdrhenals@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar mediante la teoría termoeconómica la implementación de una planta de gasificación de tusa de Maíz con vapor de agua para generación de energía eléctrica. Inicialmente se caracterizó la biomasa por medio de análisis próximo, último y ensayo de poder calorífico, obteniendo una fracción de material volátil para la biomasa de 65,23 % y una fracción de carbono fijo de 16,54 %, lo cual indica buenas propiedades para ser gasificada. Además, se determinó un poder calorífico inferior de 13,53 MJ/kg. Luego se procedió con la simulación del sistema en el software Aspen HYSYS, obteniéndose un gas con poder calorífico de 12,41 MJ/kg. Posteriormente se determinó un costo exergoeconómico de generación de 115,02 COP/kWh para un sistema de 10,1 MW, con esto se calculó una tasa interna de retorno de 65,75 % para un periodo de 20 años. Finalmente se realizó la optimización del sistema de integración energética por medio de la metodología RSM en Statgraphics Centurión XVI obteniéndose un potencial generado de 10,55 MW, un costo de generación de 113,93 COP/kWh y una eficiencia exergética de 45,8 % con lo que se obtuvo una TIR de 68,71 %. Además, se determinó el impacto del tamaño de planta sobre el costo de generación y la TIR, determinándose que el tamaño de equilibrio es 770 kW y se obtiene con un flujo másico de entrada de 360 kg/h. Los costos determinados son tipo III y por lo tanto tienen una incertidumbre del 15 %.

Palabras claves: Gasificación, exergía, simulación, exergoeconomía, optimización.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el contexto energético mundial va encaminado a la sustitución total o parcial de los combustibles fósiles, motivado principalmente por el impacto ambiental y la disponibilidad de los mismos. Es por ello que la principal cualidad del sustituto adecuado para estos combustibles debe ser propiciar un bajo impacto ambiental y provenir de una fuente de energía renovable, con la capacidad de competir económicamente con las fuentes energéticas convencionales. Entre los candidatos a competir por la hegemonía energética se encuentra la biomasa residual, que es una fuente de energía renovable que podría solventar la necesidad energética actual y a futuro, dado su potencial de almacenar energía química y su abundancia como desecho de las actividades humanas. Según la Agencia Internacional de Energía se proyecta que, para el año de 2030, el consumo de energía mundial sea aproximadamente de 22 TWh, esta cantidad comparada con la reserva energética recuperable y aprovechable de la biomasa solo es una fracción, la cual está estimada en 450 TWh [1].

En el departamento de Córdoba, uno de los principales pilares de la economía es la agricultura, que en su ejercicio produce gran cantidad de residuos agroindustriales, sobresaliendo los generados por cultivos de Maíz, Arroz, Coco, Plátano, entre otros. En el caso específico del Maíz, para el año de 2013 se disponían de 77.887 hectáreas cultivadas, cuya producción se realizaba por medio de actividades tradicionales y tecnificadas [2]. En el procesamiento de este cultivo se genera tusa como residuo, la cual en la actualidad no se aprovecha adecuadamente, incinerándose grandes cantidades trayendo consigo contaminación sin ningún beneficio energético.

Con el fin de alcanzar una política energética limpia y amigable con el ambiente, se busca implementar procesos de conversión de energía donde se haga posible obtener un producto que sea apto para implementarlo en los sistemas de generación convencionales, de manera que se establezca un puente entre la generación de energía sostenible a través de las tecnologías de generación convencionales. Entre las tecnologías de conversión de biomasa, la más atractiva a emplear es la de gasificación de materia orgánica, para producir un combustible que se pueda integrar a las instalaciones actuales de generación eléctrica, es así como se hace ineludible estudiar el funcionamiento de una instalación de gasificación.

Se considera más viable la realización del análisis de este tipo de sistemas de generación desde el punto

de vista teórico, donde se aprecie el panorama de la inversión requerida y así, conocer costos de generación, condiciones óptimas de operación y posible capacidad de la planta, debido a que este tipo de estudios no requieren gran inversión y aporta bases previas que garanticen la factibilidad de aplicación del sistema de generación, los cuales demandan gran inversión inicial para concebir esta instalación [3]. En el desarrollo de este trabajo de investigación se realiza un análisis exergoeconómico de la gasificación de tusa de Maíz con vapor integrada a MCI, donde primeramente se analiza el panorama futuro de generación del residuo con base a los registros históricos de producción. Luego se realizan ensayos de laboratorio para caracterizarla termoquímicamente la biomasa en cuestión. Posteriormente se lleva a cabo una simulación computacional del sistema de la planta a través del software Aspen Hysys. Finalmente se realiza un análisis exergoeconómico con el fin de establecer el costo de generación de energía óptimo y con base a esto evaluar la viabilidad de implementación de la tecnología por medio de la tasa interna de retorno.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio desarrollado se realizó sobre el modelo de un sistema de generación de energía con gas de gasificación, construido en el software Aspen HYSYS v.8.0 con la licencia de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería accesible bajo el convenio 753 de 2013 “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe” BPIN N° 2012000100026 (Gobernación de Córdoba-UPB Montería). Los recursos considerados en el sistema son la biomasa residual de maíz correspondiente a la tusa, el combustible sólido que alimenta el proceso de gasificación y el agua en forma de vapor que corresponde al agente gasificante del proceso.

Caracterización termoquímica de la tusa de maíz

Inicialmente se realizó la caracterización de las propiedades termoquímicas de la tusa, determinando la composición elemental por medio de un análisis último bajo la norma ASTM D7176 [4], la constitución en términos generales por medio de un análisis próximo para determinar los porcentajes de material volátil, carbón fijo, cenizas y humedad de la biomasa bajo la norma ASTM D7582 [5] y el poder calorífico con un

ensayo en bomba calorimétrica estandarizado por la norma ASTM D2015 [6].

Simulación del sistema de integración energética

Posteriormente se modeló el sistema energético en el software Aspen HYSYS® usando el paquete termodinámico de Peng-Robinson. El proceso de gasificación se realizó con un arreglo de reactores de cinética química, donde se produce el gas que alimentó la etapa generación de potencia, simulada por medio del ciclo termodinámico de un motor diésel a gas, construido mediante los elementos que análogos que siguen los mismos procesos termodinámicos. Con esto se estimó el potencial energético máximo de la tusa generada en la región para producir energía aprovechable. Luego utilizando los conceptos de la segunda ley de la termodinámica se determinó la exergía de cada línea de flujo. Además se comparó el poder calorífico del syngas con estudios experimentales del ámbito para validar el modelo del proceso de gasificación.

Evaluación exergoeconómica del sistema

Adicionalmente se determinaron los costos exergoeconómicos del sistema con la teoría exergoeconómica funcional [7]. Por medio de la teoría económica de escala se estimó el costo de inversión por equipos que conforman el sistema, luego utilizando el modelo de analogía de centro de masa con base en la producción de tusa de los principales municipios productores del departamento se seleccionó una ubicación propuesta para la planta de generación hasta donde habría que ser transportada la biomasa. Así con los costos de inversión, de transporte y de generación de energía se determinó, mediante la TIR, el panorama económico de la inversión al distribuir energía al precio de comercialización, comparándola con el índice de depreciación de la ley N° 1715 que reglamenta el uso de energías renovables [8].

Optimización del sistema de generación de potencia

Finalmente, por medio de la metodología RSM se minimizó el costo exergoeconómico de generación y se maximizó la eficiencia del sistema. En el software Statgraphics centurion XVI desarrollado por StatPoint,

se desarrolló un modelo matemático-determinístico con los datos de un análisis de sensibilidad entre las variables de entrada y salida, encontrando los valores óptimos de funcionamiento propuestos para el sistema, con base en el análisis de la superficie de respuesta de la función de deseabilidad para el costo y la eficiencia de generación. °

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización termoquímica de la tusa de maíz

La caracterización termoquímica de la tusa de maíz indicó buenas propiedades energéticas en términos generales. En la Tabla 1 se muestra el resultado del análisis próximo y el ensayo de poder calorífico, donde se destaca una fracción de material convertible de 80 % y el relativamente bajo contenido de humedad de 10,52 %. Sin embargo como aspecto negativo se tiene el contenido moderado de 7,71 % de cenizas, debido a que no es un material transformable energéticamente y su presencia posibilita la formación de óxidos corrosivo en los equipos [9].

Por otra parte, con el ensayo en bomba calorimétrica se determinó que el poder calorífico superior de la tusa es de 14,3 MJ/kg, este equivale aproximadamente al 53,2 % del poder calorífico del carbón colombiano, pero presenta la ventaja que al explotarla no genera la contaminación producida por el uso de carbón mineral, como el caso de las emisiones de SOx y la destrucción del ecosistema circundante a la zona de extracción [10].

Tabla 1. Constitución y poder calorífico de la tusa

Constitución	%p/p
Humedad relativa	10,52
Carbono fijo	16,54
Material volátil	65,23
Cenizas	7,71
Poder Calorífico	14,3 MJ/kg

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis último, donde se resalta que está compuesta por un 39,3 % de carbono. Si se compara este contenido con el contenido de ciertos tipos de carbón mineral como el caso de la turba, se tiene que la tusa contiene el alrededor del 86,5 % de la fracción de carbono y un 77 % de su poder calorífico. Con esto se destaca la si-

militud que existente entre las propiedades de la tusa y el carbón mineral de amplia explotación en la actualidad [11]. Con los datos de la composición elemental se determinó que la formula química aproximada de la tusa de Maíz es C0,924 H1,402 O0,836 N0,012.

Tabla 2. Composición elemental de la tusa

Composición	[%p/p]
C	39,3
H	4,97
N	0,6
O	47,42
Ash	7,71

La tusa de maíz es una biomasa de gran abundancia en el departamento de Córdoba, se estimó que hasta el año 2013 se produjo anualmente alrededor de 44 mil toneladas, equivalentes a 4867 kg/h, con un promedio de producción por municipio de 1900 toneladas [12]. Con lo anterior y teniendo en cuenta las propiedades energéticas de la tusa se estima que el potencial energético anual del departamento por biomasa de tusa de maíz está alrededor de los 169 GWh, equivalente a 123 mil barriles de petróleo, lo que es 6,4% aproximadamente del potencial de generación de Carbón mineral en el departamento, según los datos de la Agencia Nacional de Minería [13].

Simulación del sistema de integración energética

El modelo desarrollado en Aspen HYSYS del sistema energético se muestra en la Figura 1. Se aprecia la división del sistema en 5 subsistemas, destacándose el 1 como la unidad de generación de vapor, el 2 como el sistema de gasificación, el 3 y 4 como unidad de acondicionamiento y el 5 como la unidad de generación de potencia.

De la etapa de gasificación sale gas con poder calorífico de 12,41 MJ/kg, el cual circula por la unidad de acondicionamiento y entra al MCI para producir 10,1 MW de potencia con una eficiencia del proceso de 44,2 %, en las condiciones iniciales de operación.

Figura 1. Sistema modelado en Aspen HYSYS

Validación del modelo computacional

La validación del modelo de gasificación se realizó simulando las condiciones experimentales de algunos estudios de referencia, en general se consideraron 10 biomásas diferentes como se muestra en la Tabla 3, determinándose que el modelo incurría en un error promedio del 8,64 % con una desviación del 3,65 %, proporcionando resultados cercanos a los que se esperaría del proceso real. Así decimos que el modelo tiene buena precisión por lo tanto expresa estimaciones confiables.

Tabla 3. Comparación entre los resultados de la simulación y los experimentales

Biomasa	HHV Simulado (MJ/kg)	HHV Experimental (MJ/kg)	Error	Estudio referente
Madera	18,45	18,30	0,82%	[14]
Cardo	17,50	16,50	6,06%	[15]
Legumbres	17,98	16,82	6,90%	[16]
Pino	17,43	16,13	8,06%	[16]
Cascarilla de café	13,14	12,11	8,51%	[17]
Lodos residuales	8,30	9,10	8,79%	[14]
Miscanthus	21,67	24,024	9,80%	[14]
Cascarilla de Arroz	15,26	17,27	11,64%	[16]
Cascara de almendras	16,61	18,86	11,93%	[16]
Colza	16,20	18,81	13,88%	[14]

Evaluación exergoeconómica del sistema

Una vez definida la capacidad del sistema se determinó que el costo inicial de inversión sería aproximadamente de 25986 millones de pesos colombianos (MCOP), con costos anuales por operación y mantenimiento de 1039 MCOP. Se estipuló que la ubicación sugerida del sistema sería en el municipio San Carlos, lo cual ocasionaría costos de transporte anuales aproximadamente de 1376 MCOP.

Con este panorama económico se estimó que el costo de generación de energía sería de 115,02 COP/kWh. Paralelo a esto, considerando el precio de comercialización de la energía, el costo de generación y los costos anuales se estimó que la ganancia anual de una planta de tales características sería de 17196 MCOP. Así, al comparar los flujos de caja durante una vida útil estimada del sistema de 20 años, se generaría una tasa interna de retorno (TIR) del 65,75 %, la cual al

ser comparada con una tasa de depreciación máxima de 20 % establecida por la ley N° 1715 del 2014, indica que el sistema es viable. Sin embargo es importante aclarar que la implementación de una planta comercialmente competitiva en la región que haga uso de estas tecnologías debe estar respaldada por estudios que abarquen otros aspectos involucrados desde el punto de vista económico, dado que con este estudio se realizó partiendo de un modelo de ingeniería básica (costos tipo 3), cuya incertidumbre está alrededor del 15 %.

Optimización del sistema de generación de potencia

Al aplicar la metodología RSM a la función de deseabilidad se determinó que el sistema óptimo tiene una capacidad de 10,55 MW, funcionando a una eficiencia del 45,8 % y con un costo de generación de 113,92 COP/kWh. En la figura 2(a) se aprecia la superficie de respuesta de la función de deseabilidad. Con los valores óptimos se determinó que la nueva tasa interna de retorno es de 68,71 %, la cual es 48,71 % mayor que el índice de depreciación establecido por la ley N° 1715 del 2014. Así, tal como muestra la figura 2(b), al analizar el comportamiento de la TIR respecto a la potencia desarrollada por el sistema se pudo deducir que posiblemente el sistema es rentable funcionando a una capacidad mínima de 770 kW, donde la TIR y el índice de depreciación se igualan, lo cual se logra con el 7,4 % de la biomasa generada anualmente.

De esta manera, con base en la figura 2(b) se puede escalar el sistema hasta llevarlo a un tamaño de planta que permita aplicarlo a una región específica del departamento, donde el sistema se alimente de las fuentes de biomasa más abundantes y cercanas que tengan la capacidad de producir una potencia superior al límite.

(b)

Figura 2 (a) Superficie de respuesta de la función de deseabilidad y (b) TIR vs potencia del sistema.

CONCLUSIONES

Las características termoquímicas de la tusa brindan buenas propiedades de conversión en el proceso de gasificación, dado que el 81 % de su composición es transformable, además el modelo de gasificación simulado arroja buenas predicciones según la validación realizada obteniéndose un error promedio de 8,64 %. Por otro lado la metodología RSM permitió minimizar el costo de generación hasta 113,92 COP/kWh, obteniendo un valor adecuado de las variables termodinámicas que afectan el proceso, seguidamente en este estado óptimo se analizó comportamiento de la TIR respecto al tamaño de la planta y con base al valor máximo de depreciación establecido por la ley, de 20 %, se pudo establecer que el punto de equilibrio económico se tiene una potencia generada de 770 kW, para lo que se requiere solo con el 7,4 % de la totalidad de tusa producida en el departamento, esto indica que la inversión se recupera antes del tiempo previsto. Todo esto nos lleva a afirmar que el departamento tiene gran potencial energético aprovechable en los residuos de las actividades agrícolas, que pueden optarse como un medio de generación, sostenible económica y ambientalmente, la cual beneficiará la productividad del sector ya que al integrar energías de carácter renovable no convencional al SIN brindaría gran apoyo para saldar las deficiencias de las políticas energéticas, diversificando la matriz de fuentes de generación, brindando la capacidad de emitir respuesta ante la posibilidad de la escasez de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. Carta, R. Calero, A. Colmenal y M. Castro, Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables, Pearson Educación, S.A.: Madrid, 2009, pp. 475-524.

[2] Fenalce, «agronet,» 5 Agosto 2015. [En línea]. Available: www.agronet.gov.co. [Último acceso: 1 Junio 2015].

[3] C. Cavadía, J. León y R. Rodríguez, «Evaluación termoeconómica de generación de potencia GICC y MCI usando cascarilla de arroz del Departamento de Córdoba,» Tesis de grado UPB Montería, Montería, 2013.

[4] ASTM D7176, «Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke,» West Conshohocken. EEUU (2009), ASTM International, 2009.

[5] ASTM D7582, «Standard test methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis,» West Conshohocken. EEUU (2012), ASTM International, 2012.

[6] ASTM D2015, «Standard test method for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter,» Washington DC, EEUU (2000), ASTM international, 2000.

[7] C. Torres y A. Valero, «Curso de doctorado. Termoeconomía,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2000.

[8] Gobierno Nacional, «Ley No 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional,» Bogotá DC, República de Colombia, Congreso de Colombia, 2014.

[9] UPME, «Cadena del carbón,» Ministerio de minas y energía, Colombia, Unidad de planeación minero energética, 2012.

[10] UPME, «Resolución 595,» Ministerio de minas y energía, República de Colombia, Unidad de planeación minero energética, 2015.

[11] Raveendran, A. Ganesh y K. C. Khilar, «Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics,» Fuel, vol. 74, n° 12, pp. 1812-1822, 1995.

[12] Secretaría de Desarrollo Económico, Evaluaciones agropecuarias municipales, Gobernación de Córdoba: Montería, 2013.

[13] ANM, «Agencia Nacional de Minería,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.anm.gov.co>. [Último acceso: 28 10 2016].

[14] A. Sattara, G. Leekea, A. Hornungb y J. Wooda, «Steam gasification of rapeseed, wood, sewage sludge and miscanthus biochars for the production of a hydrogen-rich syngas,» ELSEVIER, Biomass & Bioenergy, Vol-69, p. 276–286, 2014.

[15] J. Encinar, J. González y J. González, «Steam gasification of Cynara cardunculus L. influence of variables,» Fuel processing technology. Vol 75. 27- 43. Elsevier. Badajoz, 2002.

[16] J. Muñoz y A. Posada, «Simulación de la producción de hidrógeno y metanol apartir de la gasificación de cascarilla de arroz con vapor,» Dyna, Vol 78, Nro 165, pp. 122-131, 2011.

[17] W. Klose, S. Rincón y A. Gómez, «Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Gasificación de carbonizados,» Deutsche Nationalbibliothek, Kassel, 2011.

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE METANIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS, ESTIÉRCOL DE CERDO Y DE LA INDUSTRIA CACAOTERA EN COLOMBIA

Rodríguez Aura Camila¹
Acevedo Paola Andrea¹
Santis Angélica¹
Cabeza Iván²
John Ángel¹
Edwin Rivero¹

¹ Universidad Cooperativa de Colombia
² Universidad Santo Tomás
aura.rodrigueza@campusucc.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

En este estudio, se evaluaron tres sustratos: Residuos sólidos urbanos, residuos de la industria cacaotera y estiércol de cerdo. Se desarrolló un proceso de codigestión anaeróbica, por medio de ensayo con reactores de 250 mL, en condiciones mesofilicas (32°C), obteniendo el BPM de cada uno y de la mezcla; a estos residuos se les realizó una caracterización físico-química donde se determinaron valores de sólidos volátiles, sólidos totales, materia orgánica, nitrógeno Kjeldhal y DQO. Para continuar, se determinó una relación óptima de C/N 25 para la mezcla establecida y se realizó bajo triplicado variando los gSV, del cual se determinó que la M1, fue la mezcla en donde se obtuvo una mayor obtención de metano con 2729.28 mL CH₄/g SV. Los resultados obtenidos del BPM individual, los RSU fueron el sustrato con un óptimo metanogénico de 73%, seguido del EC con un 54.78% y por último los RIC con un 29.18%.

Palabras claves: *Biomasa, codigestión anaerobia, potencial bioquímico de metano (BPM), residuos orgánicos.*

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que cuenta con políticas nacionales, con el fin de manejar, dirigir y orientar las acciones necesarias para tratar los residuos sólidos y reducir los impactos ambientales negativos. Dichas políticas se encuentran acorde a los lineamientos internacionales [1], y es a partir de ellas que se pretende aunar esfuerzos para disminuir el consumo mundial de energía primaria, generando así interés por el uso potencial de la biomasa como fuente alternativa de energía [2].

Numerosos residuos sólidos se producen a diario y en grandes cantidades en nuestro país, de estos se destacan los residuos sólidos urbanos (RSU). Para el año 2007, se llegaron a generar aproximadamente 55.000 ton/año, principalmente en las ciudades más grandes [2]. Esto se atribuye a referentes de orden cultural, económico, tecnológico y demográfico, sin mencionar la deficiencia en la planeación y gerencia del límite de vida útil de los vertederos [3]. Por tanto, se hace énfasis en buscar otras alternativas para la disposición final, que sean diferentes a los rellenos sanitarios, abono e incineración, que permitan el aprovechamiento racional de los residuos, especialmente de su fracción orgánica [4].

No obstante, la generación de los residuos a nivel nacional es más amplia. Un ejemplo es el aumento en la producción de cacao, que llegó a un 26%, tal como fue estimado en el año 2013 por la Federación Nacional de Cacaoteros [5]. Partiendo de la información anterior, la actividad desarrollada lo convierte en un generador de residuos orgánicos que aún no han sido valorizados a nivel nacional, excepto por su uso como alimento para animales de granja.

Así mismo, Colombia cuenta con un sector pecuario que comprende el 76% del sistema agropecuario en general y de esta proporción la explotación porcícola conforma el 10%, que según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), genera grandes cantidades de estiércol [6], que puede ser utilizado de diferentes formas, ya que se ha demostrado a nivel nacional que este residuo tiene un valor energético de 4.308,46 TJ/año, según La Unidad de Planeación Minero Energética [2].

Por último, los lodos procedentes de sistemas de tratamiento de aguas residuales se han estudiado previamente en los procesos de recuperación mediante la digestión anaerobia con el fin de conseguir buenas tasas de producción de biogás y aumentar la eficiencia global del proceso disminuyendo el contenido de

sólidos volátiles [7]. Es interesante utilizar este tipo de materia prima como inóculo en los procesos de codigestión anaeróbica, también teniendo en cuenta la alta disponibilidad de este tipo de biomasa en el país y los problemas con las compañías de tratamiento de agua para asegurar una gestión adecuada puesto que es necesario la estabilización si se quiere utilizar como bio-fertilizante.

En este orden de ideas, el potencial de metano bioquímico (BMP) es una prueba utilizada para caracterizar las materias primas en los ensayos relacionados con la optimización de la codigestión anaeróbica; que permite encontrar el tipo de sustrato y co-sustrato que tiene mayor potencial [8]. Sin embargo, este procedimiento tiene como desventaja el período de tiempo (20-90 días) necesarios para llevarse a cabo ([9], [10]). La probabilidad y la tasa de degradación de cada sustrato y co-sustrato depende de la concentración de los microorganismos durante la prueba, y sus principales parámetros son la relación óptima C/N, la temperatura y el pH de las muestras y los inóculos [8].

Este estudio se centra en la evaluación de la producción de metano a través del proceso de la codigestión anaeróbica utilizando diferentes sustratos disponibles en Colombia, de los cuales se tiene muy poca información sobre el rendimiento de metano (cáscara de cacao y las vainas), junto con otros residuos comunes (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y estiércol de cerdo). Esta evaluación se llevó a cabo aplicando el proceso BPM para cada tipo de residuo y su mezcla.

Este trabajo es un estudio preliminar que aclara el potencial de valorización de los residuos evaluados a través de la codigestión anaeróbica que permite nuevas oportunidades para promover la generación de energía en Colombia a través de fuentes renovables.

Materiales y métodos

En este estudio se llevó a cabo el proceso de codigestión anaeróbica utilizando reactores batch de 250 mL, en condiciones mesofílicas de 32°C, realizando un análisis del potencial bioquímico de metano (BPM) de tres sustratos: Residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de la industria cacaotera (RIC) y estiércol de cerdo (EC), los cuales previamente fueron caracterizados fisicoquímicamente evaluándoles sólidos volátiles, sólidos totales, materia orgánica, nitrógeno Kjeldahl y demanda química de oxígeno (DQO). Cada sustrato se evaluó bajo ensayos de condición estática.

Preparación del inóculo

El inóculo que se utilizó para todas las pruebas fue lodo proveniente de un biodigestor ubicado en la planta de aguas residuales de Alpina S.A., en Sopó, Cundinamarca (Colombia). Se seleccionó este lodo porque al provenir de un sistema en funcionamiento ya se encontraba estabilizado y nos daba garantía de obtener producción de biogás. Su elaboración consistió en la mezcla de 60 mL de lodo más 140 mL de agua destilada, más la cantidad correspondiente del sustrato y co-sustrato a evaluar.

Sustratos y co-sustrato

Los sustratos utilizados para el ensayo fueron residuos de la industria cacaotera (RIC), estiércol de cerdo (EC) y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU). Los sustratos fueron colocados previamente en un congelador a una temperatura de -4°C, con el fin de evitar el cambio en las características fisicoquímicas.

Los residuos de la industria cacaotera fueron simulados en laboratorio con base en las diferentes referencias halladas de esta industria ([5], [11], [12], [13]). Se utilizaron cáscara y fibras internas del cacao que fueron obtenidas de una finca privada ubicada en el departamento de Santander – Colombia. La especie de cacao trabajada para el ensayo fue trinitario, dicha especie es originada por el cruce de otras dos especies de cacao [8] y se caracteriza por una amplia variabilidad de formas, tamaños y comportamiento, siendo hoy en día el tipo de cacao que predomina en Colombia [8]. Los residuos pasaron por un proceso de reducción de tamaño donde fueron cortados y después licuados.

El estiércol de cerdo fue obtenido en el Centro de Investigaciones Agropecuarias Marengo (C.A.M) perteneciente a la Universidad Nacional ubicada en el municipio de Mosquera (Cundinamarca). Los residuos provienen de animales alimentados con concentrado comercial.

De la composición total de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bogotá, el 65% son residuos sólidos orgánicos potencialmente aprovechables [14], los cuales están constituidos por residuos de alimentos (frutas, verduras, alimento procesado y sin procesar, carnes, entre otros) pertenecientes al sector doméstico, plaza de mercados y restaurantes. La muestra utilizada para la experimentación procedía de dos hogares típicos en la ciudad de Bogotá; en ésta sólo se tomó

la fracción orgánica compuesta de verduras, frutas y alimentos procesados. Estos residuos pasaron por un proceso de reducción de tamaño y licuado.

La metodología BPM utilizada en el presente estudio, se basa en los principios descritos por Owen y por Angelidaki ([15], [16]). Las pruebas se llevaron a cabo en botellas de 250 mL por triplicado, con un volumen de trabajo del 80%. La proporción de mezcla de los sólidos volátiles del sustrato e inóculo en las pruebas individuales (S/X) fue de 1,5432 para minimizar la inhibición por acidificación o la toxicidad por amonio. Por su parte, en la mezcla de los sustratos evaluados se fijó una relación S/X de 3. El volumen total de trabajo antes mencionado se completó con agua destilada. Después las botellas fueron cerradas con tapas plásticas y selladas con silicona, no sin antes haber medido el correspondiente pH de cada sustrato y co-sustrato, el cual debería encontrarse en un rango de 6,3-7,8, con un pH óptimo de 7 [17]. Una vez selladas, las botellas se colocaron en un baño termostatzado con controlador automático sin agitación a una temperatura mesofílica constante de 32°C durante 20 días, (durante el tiempo que duró el ensayo ninguno de los reactores fue alimentado). Se asumió degradación anaeróbica completa cuando no hubo producción de metano observado. La producción de metano fue supervisada diariamente mediante desplazamiento de volumen, en donde el dióxido de carbono presente en el biogás fue retenido mediante el burbujeo del biogás en una solución NaOH (concentración 1M) fuertemente alcalino pH>9 [18].

El ensayo de co-digestión anaerobia en régimen discontinuo se llevó a cabo empleando los tres sustratos, presentando una relación de C/N 25 y se diferenciaban entre ellas por el contenido de gramos de sólidos volátiles (gSV); se probaron mezclas con 0.5 gSV, 1 gSV y 2 gSV (Tabla 1). Dicha relación permite que exista un equilibrio de nutrientes adecuado para el crecimiento de las bacterias anaerobias, así como para mantener un ambiente estable durante el proceso [19]; lo que permitirá que en la co-digestión éste actuara como una condición óptima inicial para la digestión. La composición de la mezcla se presenta en la tabla 2.

Tabla 1: Descripción de las mezclas usadas en la prueba de co-digestión

	C/N	gSV
Mezcla 1	25	0,5
Mezcla 2	25	1
Mezcla 3	25	2

Tabla 2: Composición de la mezcla de sustrato utilizado en el experimento

MEZCLA	SUSTRATOS		
	S1	S2	S3
M1	EC	RSU	RIC

EC: Estiércol de Cerdo, RSU: Residuos Sólidos Urbanos, RIC: Residuos de la Industria Cacaotera

La relación de sustratos se estableció de manera tal que se alcanzara la relación C/N y cantidad de gSV fijadas teniendo en cuenta la caracterización fisicoquímica de los sustratos empleados. Los parámetros analizados para el inóculo y los sustratos fueron los siguientes: Sólidos Totales (ST) según la 2540B de Standard Methods (APHA), Sólidos Volátiles (SV) según la D3174 de America Society for Testing and Materials (ASTM), Demanda Química de Oxígeno (DQO) según D1252 – 06 de America Society for Testing and Materials (ASTM) y Nitrógeno Kjeldhal (NTK) según D1426 – 15 de America Society for Testing and Materials (ASTM).

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La tabla 3 presenta las principales características de los sustratos, lo que facilitará la determinación de las cantidades de los mismos que serán usadas en cada ensayo de co-digestión e individuales. Los sólidos volátiles y los sólidos totales permiten determinar la cantidad de materia orgánica (MO) en el sustrato, al ser esta mayor al 70% permite inferir que existirá una buena digestión biológica en la etapa inicial de cada ensayo. Con relación al nitrógeno se puede observar que la mayoría de sustratos poseen un bajo contenido de este, lo que en un principio beneficiará el sistema, puesto que al no presentar altas concentraciones de nitrógeno esto no permitirá que en un comienzo se inhiba el proceso debido a la generación de amoníaco libre derivado de la degradación de las proteínas [7]. La concentración más baja de este parámetro lo presentan los residuos de la industria cacaotera, y se podría pensar que este afectaría el equilibrio y los requisitos de los microorganismos durante la digestión.

La producción de metano para cada sustrato durante el ensayo se presenta en la tabla 4. Los residuos sólidos urbanos presentan la más alta producción de metano con 729.827 mL CH4/g SV, y el más bajo se

muestra en los residuos de la industria cacaotera con una generación de 291.827 mL CH4/g SV. En cuanto al estiércol de cerdo, su producción fue de 547.827 mL CH4/g SV. Los anteriores residuos presentan diferentes relaciones C/N, donde la más alta se encuentra para los residuos de la industria cacaotera con 55, lo que implicaría que este será rico en carbono y pobre en nitrógeno, lo que posiblemente no permitirá una rápida fermentación del material orgánico y se presentara pérdida de carbono en forma de dióxido de carbono (CO2). Caso contrario se presenta en la relación C/N del estiércol de cerdo, el cual es de 23.8, en donde la cantidad de carbono es baja, lo que podría ocasionar que el nitrógeno se transformara en amoníaco, impidiendo la correcta actividad biológica. Para los autores Kondusamy y Kalamdhad [17] las bacterias en la digestión anaerobia utilizan el carbono 25-35 veces más que el nitrógeno, lo que implica que para una mejor digestión, la relación entre el carbono y nitrógeno deberá estar dada en un rango de 30:1 en el sustrato. Teniendo en cuenta lo anterior, los residuos de estiércol de cerdo son los que tienen una relación C/N óptima para el proceso de digestión.

Tabla 3: Características fisicoquímicas de los sustratos

SUSTRATOS	PARÁMETROS				
	ST (%) ^b	SV (%) ^b	DQO (g/L) ^a	NTK (%) ^a	MO (%)
Lodos de depuradora	19,23	30,64	46,07	4,17	80
Estiércol de cerdo	31,47	24,31	25,71	1,88	77,24
Residuos de la industria cacaotera	15,94	14,96	10,46	0,99	93,85
Residuos sólidos urbanos	22,76	21,24	13,73	1,56	93,32

a. Muestra sobre base seca (b.s.) /
b. Muestra sobre base húmeda (b.h.)

Otro factor a tener en cuenta en la generación de metano es el tratamiento previo que se realizó para los diferentes sustratos, en donde hubo una disminución del tamaño de cada residuo. Para los residuos de cacao, fue necesario realizar un corte con el fin de reducir el tamaño de partícula de este para posteriormente ser licuados. Para Veeken y Hamelers [20] una disminución de la partícula permitirá que los grandes polímeros orgánicos (hidrocarburos, lípidos, proteínas) del sustrato sean mas fáciles de biodegradar por los microorganismos en las diferentes etapas de la digestión anaerobia especialmente en la etapa hidrolítica ya que es la que limita la velocidad global del proceso.

Tabla 4: Producción de metano de los diferentes sustratos usados en el ensayo

Sustratos	mL CH ₄ /g SV	C/N
Estiércol de cerdo	547,827	23,8
Residuos sólidos urbanos	729,827	34,7
Residuos de la industria cacaotera	291,827	55

En cuanto a los residuos sólidos urbanos estos presentan una producción mucho más alta, que la reportada en la bibliografía hallada para ese residuo, puesto que la generación de metano para el ensayo fue de 729.827 mL CH₄/g SV, mientras que la consultada está alrededor de los 323 mL CH₄/g SV ([21], [22], [23], [24]). Se debe tener en cuenta que esta diferencia en la producción de metano dependerá de varios factores, entre lo que se puede mencionar los diferentes residuos usados para el ensayo, así como las diferentes moléculas orgánicas que componen estos residuos.

La figura 1 compara los resultados de los BMP de cada una de las 3 mezclas con los resultados obtenidos para sus componentes de manera individual. Se encontró que la mezcla 1 (M1; 0,5 gSV) tiene el mayor BMP, 2729.289 mL CH₄/g SV. Esto significó un aumento del 73% en la producción de metano en comparación con lo alcanzado por los residuos sólidos urbanos de manera individual. Este aumento sugiere una mejor interacción entre la mezcla de los sustratos, y puede explicarse gracias al contenido de macro y micronutrientes del estiércol de cerdo y de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos que apoyan el proceso, incluso el sistema de amortiguación.

Figura 1: Potencial biológico de producción de metano de las mezclas con relación C/N de 25.

Las otras dos mezclas (M2; 1 gSV y M3; 2 gSV) muestran un menor potencial de metanización en

comparación con el obtenido por sus sustratos en forma individual. Durante la experimentación no se detectó ningún proceso inhibitorio por lo que los bajos rendimientos se atribuyen a la variación de los g SV en cada mezcla.

El proceso de co-digestión muestra que es posible reducir la desviación en la producción de biogás para cada mezcla en comparación con los rendimientos de los sustratos individuales. Esto se relaciona con el uso del lodo de depuradora de un biodigestor como sustrato soporte y la continua disponibilidad de metabolitos que mantienen la actividad del consorcio.

CONCLUSIONES

Los tres residuos evaluados (estiércol de cerdo, residuos de la industria cacaotera y residuos sólidos urbanos) tienen la capacidad de ser utilizados para la producción de metano. En el ensayo de BPM los residuos sólidos urbanos fueron los de mayor producción de metano con 729.827 mL CH₄/g SV, seguido del estiércol de cerdo con una generación de 547.827 mL CH₄/g SV. Un tratamiento antes de la digestión beneficiaría al sistema para la fácil degradación de macromoléculas y aumentara la velocidad de hidrolización. Además, los resultados del ensayo de co-digestión anaerobia indican que la mejor mezcla en términos de producción de biogás es el M1 con una relación C/N 25 y unos g SV de 0,5, lo que permite inferir una condición óptima al inicio del experimento. Esta mezcla reporta una producción de metano de 2729.289 mL CH₄/g SV. Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos permiten visualizar que la aplicación de esta metodología sirve como una valorización de los residuos sólidos que causan un impacto negativo sobre el ambiente. El potencial de biogás encontrado para los sustratos en sus individuales y sus mezclas es la primera fase para la creación de modelos empíricos que puedan optimizar el proceso de co-digestión anaerobia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ideam-Unicef-Cinara, Marco Político y Normativo Para La Gestión Integral de Residuos Sólidos, Cali, Colombia, 2005.

[2] UPME, Atlas del Potencial Energético Nacional de la Biomasa Residual, Colombia, 2011.

- [3] Procuraduría General de la Nación, Informe de Seguimiento Gestión de Residuos Sólidos en Colombia, Bogotá, 2004.
- [4] S. Rodríguez, Residuos Sólidos en Colombia: Su manejo es un compromiso de todos. L'esprit Ingénieux, 2011, vol. 2, no. 1.
- [5] Federación Nacional de Cacaoteros, Guía Ambiental Para el Cultivo Del Cacao, Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2013.
- [6] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Anuario Estadístico del Sector Agropecuario, Bogotá, Colombia, 2006.
- [7] J. Fierro Fernández, "Co-digestión de purines, residuos urbanos y de la industria del biodiesel," Tesis Doctoral, Universidad de León, León, España, 2014.
- [8] E. Elbeshbishy, G. Nakhla, and H. Hafez, "Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: Influence of inoculum pre-incubation and inoculum source," Bioresour. Technol., vol. 110, pp. 18-25, 2012.
- [9] J. Doublet, A. Boulanger, A. Pontieux, C. Laroche, M. Poitrenaud, and J.A. Cacho Rivero, "Predicting the biochemical methane potential of wide range of organic substrates by near infrared spectroscopy," Bioresour. Technol., vol. 128, pp. 252-258, 2013.
- [10] G. Bekiaris, J.M. Triolo, C. Peltre, L. Pedersen, L.S. Jensen, and S. Bruun, "Rapid estimation of the biochemical methane potential of plant biomasses using Fourier Transform Mid-infrared Photoacoustic spectroscopy," Bioresour. Technol., vol. 197, pp. 475-481, 2015.
- [11] S. Yepes, L. Montoya Naranjo, and F. Orozco Sánchez, "Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del Valle de Aburrá, Colombia," Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín, vol. 61, no. 1, pp. 4422-4431, 2008.
- [12] E. Escobedo Álvarez, "Desarrollo de un proceso para el aprovechamiento integral de la toronja," Ciencia y Tecnología, vol. 1, no. 13, pp. 365-376, 2013.
- [13] E. L. Hernández Melo, N. Olguín Trinidad, and T. Quiroz Ortega, "Industria del Cacao: Mercado nacional e internacional," México, 2012.
- [14] Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos, "Caracterización De Los Residuos Sólidos Residenciales Generados En La Ciudad de Bogotá (UAESP)," Bogotá, Colombia, 2011.
- [15] W. Owen, D. Stuckey, J. Healy, L. Young, and P. McCarty, "Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity," Water Res., vol. 13, no. 6, pp. 485-492, 1979.
- [16] I. Angelidaki, D. Alves, L. Bolonzella, J. Borzacconi, A. Campos, S. Guwy, J. Van Lier, "Defining the biochemical methane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays," Water Sci. Technol., vol. 59, no. 5, pp. 927-934, 2009.
- [17] D. Kondusamy, and A. Kalamdhad, "Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production" – A review," J. Environ. Chem. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 1821-1830, 2014.
- [18] E. D. Cendales Ladino, "Producción de biogás mediante la co-digestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable," Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2011.
- [19] C. Zhang, H. Su, J. Baeyens and T. Tan, "Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production," Renew. Sustainable Energy Rev., vol. 38, pp. 383-392, 2014.
- [20] A. Veeken and B. Hamelers, "Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components," Bioresour. Technol., vol. 69, no. 3, pp. 249-254, 1999.
- [21] A. Nielfa, R. Cano and M. Fdz-Polanco, "Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge," Biotechnol. Rep., vol. 5, pp. 14-21, 2015.
- [22] A. Nielfa, R. Cano, M. Vinot, E. Fernandez and M.F. Polanco, "Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste," Process. Saf. Environ, vol. 94, pp. 180-187, 2015.
- [23] J. Browne, E. Allen and J. Murphy, "Assessing the variability in biomethane production from the organic fraction of municipal solid waste in batch and continuous operation," Appl. Energ., vol. 128, pp. 307-314, 2014.
- [24] L. Alibardi and R. Cossu, "Composition variability of the organic fraction of municipal solid waste and effects on hydrogen and methane production potentials," Waste Manage., vol. 36, pp. 147-155, 2015.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS TIPOS DE BIOMASA PARA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN BRASIL

Padilla, Elías Ricardo D.¹
Hansted, Ana Larissa S.²
Nakashima, Gabriela T.³
Yamaji, Fabio M.⁴

^{1,2,3} Universidad Federal de São Carlos-Brasil, Grupo de Investigación Biomassa e Bioenergía
⁴ Universidad Federal de São Carlos-Brasil, Dpto. Ciencias Ambientales/UFScar-Sorocaba.
¹erdurango22@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

Actualmente con la demanda energética asociada a los combustibles fósiles, fuentes alternativas de energía vienen siendo investigadas visando la sustitución parcial o total de estos combustibles no renovables. El objetivo del presente trabajo fue comparar cascara de arroz (*Oryza sp.*) y aserrín de Cambará (*Gochnatia polymorpha*) mediante análisis química inmediata visando su utilización como biocombustible solido en Brasil. Los materiales fueron caracterizados con respecto al tamaño de partículas, densidad, contenido de humedad, ceniza, carbono fijo y volátil con tres repeticiones para cada test. Fueron elaboradas dos tipos de briquetas con 15 repeticiones: tratamiento T1 - 100% de cáscara de arroz y T2 - 25% de cáscara de arroz y 75% aserrín de Cambará, sin calentamiento y sin adición de aglutinante. Se evaluó la resistencia mecánica mediante ensayo de tracción por compresión diametral y la expansión longitudinal de las briquetas. La análisis química inmediata mostró que la cascara de arroz presentó mayor contenido de cenizas que el aserrín de Cambará. En promedio la expansión longitudinal de T1 y T2 fue de 9,27% y 7,95% respectivamente y la resistencia a la tracción fue de 0,049 y 0,460 MPa respectivamente. Por lo tanto el tratamiento T2 presento mejores características mecánicas y energéticas que T1.

Palabras claves: Biomasa, Briquetas, Fuentes da energía, Resistencia mecánica.

INTRODUCCIÓN

La energía es uno de los factores clave en el desarrollo económico y social de un país. Según las estimaciones de la Agencia Internacional de Energía, el consumo mundial de energía aumentará un tercio entre 2010 y 2035 [1]. Con estas y otras consideraciones, en las últimas cuatro décadas, Brasil ha promovido proyectos de investigación y desarrollo direccionados a la producción de energía renovable con el objetivo de asegurar una matriz energética sustentable.

En Brasil, desde mediados de la década de 1970 varios gobiernos han puesto en marcha políticas de energía para aumentar el uso de biocombustibles, alcanzando según la Empresa de Investigación Energética, en el año 2013 un consumo del 41,0% de energía proviene de fuentes renovables, mientras que en el mundo el consumo fue sólo de 13,0%. Siendo la biomasa la fuente renovable principal en la matriz energética brasileira, en 2013 contribuyo aproximadamente con el 24,5% de la oferta interna de energía del país, destacándose los usos de la leña, carbón vegetal, caña de azúcar y sus derivados [2].

Teniendo en cuenta que Brasil es un país productor agrícola, la biomasa producida cada año después de las cosechas tradicionales, está disponible en grandes cantidades y puede ser utilizada como una fuente de energía renovable y sustentable. Por ejemplo para las cosechas de 2014/15, la CONAB estimó una producción de 12,40 millones de toneladas de arroz, de las cuales 49.500 toneladas fueron producidas en el estado de São Paulo [3]. Considerando una producción de 260 kg de cascara por cada tonelada arroz cosechado, se produjeron teóricamente cerca de 3,22 millones de toneladas de cascara disponibles para generación de energía [4].

Aunque la biomasa agroindustrial tenga amplia disponibilidad, su utilización directa como fuente de energía no es eficiente ya que generalmente presenta bajo poder calorífico y baja densidad, lo cual causa baja eficiencia energética y problemas de manipulación, transporte y almacenamiento [5], [6]. La producción de briquetas utilizando diversos tipos de biomasa, viene siendo una técnica ampliamente utilizada para solucionar estos inconvenientes y aprovechar de forma más eficiente la materia prima, una vez que esta técnica permite aumentar la energía por unidad de volumen [7].

Recientemente varios estudios fueron realizados con el objetivo de caracterizar y evaluar la disponibilidad de residuos agrícolas y forestales para producir

briquetas, incluyendo además estudios de viabilidad técnico-económica y las perspectivas de la industria en Brasil [4], [5], [7], [8], [9]. Trabajos similares ya fueron realizados en otras partes del mundo, principalmente enfocados en densificar materiales como aserrín, cáscara de arroz, cáscara de maní, fibras de coco y palma [10], en Kenya por ejemplo estudiaron la posibilidad de utilizar briquetas de serrín y paja de trigo como combustible [11].

Los residuos forestales son ampliamente utilizados como materias primas en la fabricación de briquetas, por ejemplo Li y Liu emplearon el proceso de pistón-molde para densificar tres tipos de residuos de madera [12]. El Cambará se puede encontrar en la foresta brasileira, desde el estado de Bahía hasta Río Grande del Sur, el crecimiento de esta especie es lento, sin embargo, cuenta con la producción de hasta 9,20 m³/ha/año y los usos en el mercado actual, son principalmente para postes y pilares utilizados en la construcción civil [13].

Debido a la posibilidad de producir briquetas utilizando también residuos agrícolas, investigadores han comparado los costos de producción y la calidad de briquetas elaboradas de biomasa agrícola y forestal, encontrando que briquetas de aserrín generalmente presentan alta calidad [14]. Las briquetas elaboradas con cáscara de arroz, poseen alto poder calorífico, pero baja resistencia mecánica [15]. Por lo tanto, en este trabajo fueron mezclados cáscaras de arroz y aserrín de Cambará, con el objetivo de producir briquetas con mejores propiedades mecánicas y comparar los materiales utilizando análisis química inmediata visando su utilización como biocombustible solido en Brasil.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cáscaras de arroz y el aserrín de cambará, fueron recolectados en la ciudad de Santa Cruz de Rio Pardo-SP y en Sorocaba-SP respectivamente. Inicialmente, fue determinado el contenido de humedad de los materiales utilizando una balanza determinadora de humedad marca Marconi ID 200. Luego fue calculada la densidad a granel de la cascara de arroz y el aserrín de Cambará, según la norma ABNT NBR 6922 [16], el resultado se expresó como la masa contenida en un volumen de 1000 ml.

Los materiales fueron secados en estufa con circulación de aire a 110°C. Una vez secos, la cascara de arroz fue triturada utilizando un molino marca Willey MA-340 y luego se procedió con la clasificación de par-

tículas, para ello 100,00 gramos de cada material fue analizado por el método de tamices estandarizados, siguiendo la norma ABNT NBR 7181 [17]. Durante el procedimiento se usaron tamices de 20, 35, 60, 100 y 200 mesh y un tamizador vibratorio orbital marca Marconi MA-75 para agitar la muestra durante 15 min.

Análisis química inmediata

La análisis química inmediata consistió en determinar el contenido de material volátil, ceniza, y carbono fijo de la cascara de arroz y el aserrín cambará antes de producir las briquetas. Fueron realizados tres repeticiones para cada ensayo siguiendo el procedimiento de la norma ABNT NBR 8112 [18].

Fabricación y ensayo de las briquetas

Para fabricar las briquetas el contenido de humedad en los materiales fue ajustado para 12,00%, aplicando agua gradualmente con un spray. Con el fin de comprobar el contenido de humedad, 1,00 gramo de cada material se analizó en una balanza determinadora de humedad. Se procedió entonces a fabricar dos tipos de briquetas T1 (100% cascara de arroz) y T2 (75% Aserrín de Cambará, 25% Cascara de arroz), con 15 repeticiones para cada tratamiento. Cada briketa se fabricó manteniendo una presión de 122,31 MPa sobre 20,00 g de cada tratamiento durante 30 segundos, sin calentamiento y sin adición aglutinante. Se utilizó una prensa hidráulica de 30 toneladas marca Marconi MPH-30 y moldes cilíndricos de 35,00 mm de diámetro y 160,00 mm de alto durante el procedimiento.

Luego de fabricadas las briquetas con el fin de acompañar su expansión longitudinal, se midió la altura utilizando un calibrador pie de rey con precisión de 0,01 mm, las mediciones se repitieron en intervalos de 4 horas hasta que las briquetas alcanzaron estabilidad dimensional. Cuatro días después de fabricadas las briquetas, fue realizado el ensayo de tracción por compresión diametral para cuerpos cilíndricos siguiendo la norma ABNT NBR 7222 [19].

Para los ensayos mecánicos se eligieron aleatoriamente 10 cuerpos de prueba por tratamiento y con la ayuda de una máquina universal de ensayo marca EMIC - modelo DL30000 y una célula de carga de 5 kN, se aplicó la carga en la dirección perpendicular a la presión de compactación, con una velocidad de 3 mm/min. El Análisis estadísticos de los resultados fue realizado en el programa Statgraphics versión 2.15.05. La estadística comparó los datos obtenidos mediante el

método de homogeneidad Bartlett, varianza ANOVA y Tukey. Para todos los análisis fue considerado un nivel de confianza de 95% ($\alpha=0,05$) [20].

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados mostraron que el contenido de humedad inicial de la cascara de arroz y el aserrín de Cambará fue de 12,47 y 12,22%, respectivamente. En la literatura se encontró que la cáscara de arroz y el aserrín de cambará generalmente presentan contenido de humedad aproximadamente de 10,61% y 15,00% respectivamente [21], [22] y el contenido de humedad adecuado para fabricar briquetas varía de 10% a 15% [23]. Por lo tanto, se puede decir que los valores encontrados están en el rango recomendando para fabricación de briquetas y próximos a los encontrados en la literatura a excepción del aserrín de cambará.

La densidad de los materiales es un indicador técnico importante ya que define la logística de transporte y almacenamiento de las materias primas [24]. Fueron encontrados densidades de 110 kg/m³ y 190 kg/m³ para la cascara de arroz y el aserrín de cambará respectivamente, indicando la necesidad de grandes áreas para almacenar toneladas de residuos sin densificar. Estudios indican que la cascara de arroz posee densidad a granel entre 100 y 150 kg/m³ [25]. Específicamente para aserrín de cambará no se encontraron valores de densidad registrados, no obstante, el resultado obtenido en este estudio fue superior, comparado con el aserrín de eucalipto que tiene densidad de 180 kg/m³ [7].

Los tamaños de partícula en los materiales es un parámetro que está directamente relacionado con las fuerzas que mantiene unidas las partículas después de compactadas. Estudios indican que partículas de tamaño menor son más fáciles de compactar y producen briquetas más resistentes [25], [26]. La clasificación granulométrica de los materiales se puede observar en la figura 1. Después de triturada la cascara de arroz, aproximadamente el 48% de las partículas presentaron tamaños entre 0,84 y 0,5 mm (20 y 35 mesh) y el 52% tamaños inferiores a 0,5 mm. El aserrín de Cambara no fue triturado ya que como se puede observar en la clasificación granulométrica, los tamaños pueden ser considerados finos. El proceso que generó el aserrín dejó aproximadamente el 43% de las partículas con tamaños entre 0,5 y 0,14 mm y un 57% de tamaños menores a 0,14 mm, lo cual es ventajoso para la fabricación de briquetas.

Figura. 1 Clasificación granulométrica de los materiales (base seca)

Análisis química inmediata

La Tabla 1 compara el porcentaje de volátiles, cenizas y carbono fijo de la cascara de arroz y el aserrín de cambará. Los resultados evidencian que la cascara de arroz contiene un alto porcentaje de cenizas, considerado el principal problema de esta biomasa [27], debido a que la cenizas causa corrosión durante la densificación [23] y problemas en la combustión [28]. El aserrín de cambará presento 5,5% de cenizas, por tanto mostro 70% menos contenido de cenizas que la cascara de arroz, indicando un menor contenido de impurezas.

Tabla 1. Resultados análisis química inmediata (base seca)

Material	% volátiles	% Cenizas	% Carbono Fijo
Cáscara de Arroz	76,00%	18,82%	5,18%
Aserrín de Cambará	84,73%	5,50%	9,77%

El análisis del contenido de cenizas es importante en la evaluación energética de estos materiales, ya que la ceniza no contribuye al calor global liberado durante la combustión [28]. Según valores encontrados en la literatura, la cascara de arroz contiene 61,20%, 22,50% y 16,30% de volátiles, cenizas y carbono fijo, respectivamente [29], indicando que la elevada cantidad de ceniza presente en la cáscara de arroz es un factor característico de esta biomasa, constituida principalmente por sílice [27].

Contrario a las cenizas, los volátiles y carbono fijo contribuyen positivamente con el poder calorífico de la biomasa [30]. El aserrín de cambará presentó mayor porcentaje de volátiles y carbono fijo que la cascara de arroz, generalmente residuos madereros poseen mayor porcentajes de estos constituyentes que residuos

agroindustriales por lo cual son más utilizados como combustibles. El cambará fue estudiando junto con 11 especies forestales nativas de Brasil para producción energética y se encontró que los residuos contienen 79,50%, 0,90% y 19,60% de volátiles, cenizas y carbono fijo, respectivamente [31].

Fabricación y ensayo de las briquetas

La formación de briquetas fue posible para ambos tratamientos sin adicionar aglutinante en las misturas y sin utilizar calentamiento durante el proceso de densificación, como se muestra en la figura 2.

Figura. 2 Briquetas tratamiento T1 (A) y Tratamiento T2 (B)

El ensayo de expansión longitudinal busca evaluar como las briquetas se expanden después de fabricadas, hasta alcanzar la estabilidad dimensional [32]. Los resultados mostraron que la expansión de T1 fue mayor en comparación con T2 y ambos tratamientos alcanzaron una estabilidad dimensional después de cuatro días. En promedio T1 y T2 se expandieron longitudinalmente 9,27% y 7,95% respectivamente, indicando que briquetas de cascara de arroz tiende a desintegrarse con mayor facilidad que la mistura utilizada en T2. Al utilizar 75% aserrín de Cambará en el tratamiento T2 aumentó la cantidad de partículas con granulometría fina (menores a 100 mesh), posiblemente la disminución de la expansión en el tratamiento T2 sea atribuido a estas partículas [11], [26]. Los resultados fueron validados estadísticamente y la prueba ANOVA permitió confirmar que hubo una diferencia estadísticamente significativa entre las media de los dos tratamientos. El estadístico de Bartlett mostró que no hubo diferencia estadística entre las desviaciones estándar de los datos.

El ensayo de tracción por compresión diametral se llevó a cabo después que las briquetas alcanzaron la

estabilidad dimensional. Los resultados mostraron que las briquetas del tratamiento T1 obtuvieron en promedio una resistencia a la tracción de 0,049 MPa. Esta resistencia, relativamente baja comparada con la presentada por tratamiento T2 que fue de 0,46 MPa, puede estar relacionada con los resultados anteriores ya que briquetas con mayor expansión longitudinal generalmente se tornan menos resistentes.

Por tanto briquetas fabricadas utilizando solo cascara de arroz tienen baja resistencia, sin embargo al mezclar aserrín de cambará con cascara de arroz (tratamiento T2) se producen briquetas más resistentes y con menos expansión longitudinal. Deniz, *et al.* obtuvo resultados similares al trabajar con cáscara de arroz, semillas de durazno y aserrín de eucalipto. Los resultados fueron validados estadísticamente y la prueba ANOVA permitió confirmar que hubo una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la resistencia a la tracción de las briquetas.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que el aserrín de Cambará y la cascara de arroz pueden ser utilizados en la fabricación de briquetas sin adicionar aglutinante en las misturas y sin utilizar calentamiento durante el proceso de densificación, los resultados evidenciaron que las briquetas elaboradas con 100% cascara de arroz (tratamiento T1) presentaron bajas propiedades mecánicas indicando baja calidad y al ser utilizada la mezcla con 75% aserrín de Cambará 25% cascara de arroz (tratamiento T2), las propiedades fueron mejoradas considerablemente. De acuerdo con los resultados de análisis química inmediata se puede concluir que el aserrín de Cambará comparado con la cascara de arroz mostró mayor potencial para su uso como biocombustible sólido ya que presentó mayor contenido de material volátil y carbono fijo y además 70% menos contenido de cenizas, lo cual reduce la posibilidad de problemas durante la densificación y combustión de esta biomasa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo concedido por el grupo de investigación Biomassa y Bioenergia de la universidad Federal de Sao Carlos (UFSCar- Sorocaba) para la realización del presente trabajo. En especial al profesor Fábio Minoru Yamaji, por la atención y la asistencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEA, "World energy outlook," September 2011, [Online]. Available: <https://goo.gl/uC4KpE>
- [2] EPE, "Balanço Energético Nacional 2013: Ano Base 2012", [Online]. Disponível: <https://goo.gl/cJKaBt>
- [3] CONAB, "Séries históricas: arroz safra 2014/15", [Online]. Disponível: <http://goo.gl/pCqF75>
- [4] J. Portugal-Pereira, R. Soria, R. Rathmann, R. Schaeffer, and A. Szklo, "Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 81, pp. 521-533, Oct. 2015.
- [5] F. F. Felfli, J. M. Mesa P, J. D. Rocha, D. Filippetto, C. A. Luengo, and W. A. Pippo, "Biomass briquetting and its perspectives in Brazil". *Biomass. Bioenerg.*, vol. 35, no. 1, pp. 236-242, Jan. 2011.
- [6] L. D. Rodrigues, I. T. D. Silva and B. R. P. D. Rocha, "Uso de briquetes compostos para produção de energia no estado do Pará", in *Proc. 4th Enc. Energ. Meio. Rural.*, Campinas, 2002, pp. 1-6.
- [7] D. A. Silva, G. T. Nakashima, J. L. Barros, A. L. Da Roz, and F. M. Yamaji, "Caracterização de biomassas para a briquetagem". *Floresta*, vol. 45, no. 4, pp. 713-722, Dez. 2015.
- [8] T. Forster-Carneiro, M. D. Berni, I. L. Dorileo, and M. A. Rostagno, "Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil". *Resour. Conserv. Recy.*, vol. 77, pp. 78-88, May. 2013.
- [9] T. H. P. Alvarenga, S. Sartori, L. M. S. Campos, and C. M. T. Rodriguez, "Briquette production and its contribution for the energy sustainability: A case study in Brazil", *Rev. Espacios*, vol. 37, no. 13, pp. 18-26, March 2016.
- [10] O. C. Chin, and K. M. Siddiqui, "Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 18, no. 3, pp. 223-228, March 2000.
- [11] L. Wamukonya, and B. Jenkins, "Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya". *Biomass. Bioenerg.*, vol. 8, no. 3, pp. 175-179, Nov. 1995.
- [12] Y. Li, and H. Liu, "High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel". *Biomass. Bioenerg.*, vol. 19, no. 3, pp. 177-186, Nov. 2000.

- [13] A. Hideyo, and L. Zimback, "Influência do espaçamento na conformação do fuste, diâmetro à altura do peito e altura do cambará – *Gochnatia polymorpha*", *Rev. Inst. Florest.*, vol. 22, no. 2, pp. 289-295, dez. 2010.
- [14] M. J. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworkowski, M. Krzyżaniak, P. Gulczyński, and M. Mleczek, "Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass". *Renew. Energ.*, vol. 57, pp. 20-26, Sept. 2013.
- [15] J. Diniz, A. de L. Cardoso, J. A. Stahl, M. A. Villetti, and A. F. Martins, "Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise", *Ciênc. Nat.*, vol. 26, no. 2, pp. 25-32, 2004.
- [16] *Carvão Vegetal - Ensaio Físicos Determinação da Massa Específica e Densidade a Granel*, ABNT NBR 6922, 1981.
- [17] *Análise Granulométrica: Solo*, ABNT NBR 7181, 1984.
- [18] *Carvão vegetal: análise imediata*, ABNT, NBR 8112, 1986.
- [19] *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*, ABNT, NBR 7222, 1993.
- [20] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. 7th ed, New York: John Wiley and Sons, 2008, pp. 21-54.
- [21] M. R. Morais, O. Seye, and K. T. D. Freitas, "Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação", in *Proc. 4th Enc. Energ. Meio Rural*. Campinas, 2006, pp. 1-6.
- [22] L. S. Alves, "Aproveitamento de resíduos de empresas moveleiras da região de São José do Rio Preto para confecção e avaliação de painéis aglomerados", dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, 2013.
- [23] A. K. Tripathi, P. V. R. Iyer, and T. C. Kandpal, "A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 14, no. 5, pp. 479-488, May 1998.
- [24] H. S. Kambo, and A. Dutta, "Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization", *Appl. Energ.*, vol. 135, pp. 182-191, Dec. 2014.
- [25] R. I. Muazu, and J. A. Stegemann, "Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs", *Fuel. Process. Technol.*, vol. 133, pp. 137-145, May 2015.
- [26] N. Kaliyan, and R. V. Morey, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products", *Biomass. Bioenerg.*, vol. 33, no. 3, pp. 337-359, March 2009.
- [27] R. Pote, "Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant". *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 53, pp. 1468-1485. January 2016.
- [28] B. Jenkins, L. L. Baxter, and T. R. Miles, "Combustion properties of biomass". *Fuel. Process. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 17-46, March 1998.
- [29] C. Yin, "Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses", *Fuel*, vol. 90, no.3, pp. 1128-1132, March 2011.
- [30] A. Demirbas, "Combustion characteristics of different biomass fuels", *Prog. Energ. Combust.*, vol. 30, no. 2, pp. 219-230, Jan. 2004.
- [31] T. C. Cintra, "Avaliações de espécies florestais nativas plantadas na região do médio Paranapanema, SP", dissertação de mestrado, Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil, 2009.
- [32] E. R. D. Padilla, I. C. S. Pires, F. M. Yamaji, and M. M. Fandiño, "Produção e Caracterização Físico-Mecânica de Briquetes de Fibra de Coco e Palha de Cana-de-Açúcar". *RVq*, to be published.

OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES POR MEDIO DE HIDRÓLISIS SUBCRÍTICA EN UNA UNIDAD DE LABORATORIO SEMICONFINUA, A PARTIR DE LA HOJA DE MAÍZ (ZEA MAYS).

. López Vanegas, Alexandra¹
Rodríguez Buitrago, Juan David¹
Marulanda, Víctor¹

¹ Universidad de La Salle
vfmarulanda@unisalle.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

Las mayores problemáticas ambientales en la actualidad, son la generación de grandes cantidades de residuos agroindustriales, los cuales no tienen ningún tipo de aprovechamiento, y el uso excesivo de combustibles fósiles que contribuyen al aumento de la concentración de los gases de invernadero. Debido a lo anterior, en el presente trabajo se estudió la hidrólisis subcrítica en una unidad semi continua como alternativa para el aprovechamiento de residuos agroindustriales, en donde para este caso corresponde a la Hoja de Mazorca (Zea Mays.) la cual es desechada en las principales plazas de mercado de Bogotá sin ningún tipo de reutilización, con el fin de producir azúcares fermentables, los cuales pueden ser usados para la obtención de bioetanol. En este proyecto, se contemplaron las condiciones experimentales apropiadas para la obtención de azúcares reductores, evaluando los factores como la temperatura, presión y tiempo de residencia, a través de un diseño factorial experimental y midiendo como variable de respuesta el porcentaje de azúcares reductores a través del método colorimétrico del ácidonitrosalicilo o DNS. Los resultados mostraron que se obtienen mayores eficiencias a temperaturas altas y caudales bajos, los cuales permiten un tiempo de contacto adecuado para lograr la hidrólisis y minimizar la descomposición de los azúcares, obteniendo eficiencias máximas del 19% en comparación con el máximo teórico de 25% al considerar la celulosa como una de los compuestos con mayor aporte de azúcares, por lo cual se concluye que la hidrólisis subcrítica es una técnica eficiente para el aprovechamiento de residuos lignocelulosicos.

Palabras claves: Hoja de Mazorca, Hidrólisis, Azúcares reductores, Condiciones Sub críticas, Semi-continuo.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayoría de los procesos industriales tales como la producción industrial y el transporte de productos y personas se basan principalmente en la combustión de productos fósiles y recursos no renovables. Dadas las problemáticas causadas por la explotación masiva de estos hidrocarburos, existe el interés de crear nuevas formas de obtener energía de forma renovable, a partir de métodos no convencionales de recursos naturales tales como la energía eólica, solar y biocombustibles. Estos últimos son considerados como la forma más importante de producción de energía renovable, siendo alcoholes, éteres, ésteres y otros compuestos químicos, producidos a partir de biomasa, como las plantas herbáceas y leñosas, residuos de la agricultura y actividad forestal, y una gran cantidad de desechos industriales, como los desperdicios de la industria alimenticia [1].

La obtención de biocombustibles procede por distintos métodos dependiendo de las materias primas que se utilicen, cuando la obtención de etanol es a partir de carbohidratos de origen vegetal o de polímeros simples como la sacarosa y el almidón estos son denominados de primera generación, no obstante cuando el etanol es obtenido a partir de polímeros más complejos tales como la hemicelulosa y la celulosa son denominados de segunda generación. Cabe mencionar que los materiales que son utilizados en la producción de biocombustibles de primera generación tales como frutos y tubérculos son menos abundantes que las materias primas de los biocombustibles de segunda generación; ya que estas materias primas se componen principalmente de biomasa de alimentos no consumibles por el ser humano tales como las hojas de caña, pastos, entre otros, [2] siendo comúnmente residuos orgánicos. Los azúcares contenidos en jugos de frutos, en caña de azúcar y remolachas, se pueden utilizar como otra fuente de carbono; sin embargo, la principal limitante para aprovechar la biomasa es la disponibilidad de los compuestos fermentables en la etapa de obtención de etanol, por esta razón es necesario incorporar pretratamientos mecánicos y de hidrólisis que modifiquen la estructura de la biomasa. La mayoría de la glucosa en la lignocelulosa está localizada dentro de los polímeros cristalinos de la celulosa. La hemicelulosa también los contiene pero en forma de copolímeros conformados por glucosa, xilosa y otros. Sin embargo, la lignina que es el tercer componente mayoritario en la lignocelulosa dificulta los procesos de hidrólisis al estar integrado por un polímero aromático complejo. Por lo anterior es necesario

incorporar tratamientos de hidrólisis que disminuyan la formación de compuestos inhibitorios que afecten el proceso de fermentación. [3]

Para la obtención de azúcares fermentables utilizan diversos tipos de hidrólisis ya sea ácida, alcalina o enzimática, métodos que consisten en adiciones de ácidos, bases o enzimas en altas o bajas condiciones de temperaturas y concentraciones, promoviendo la remoción previa de la lignina y la hemicelulosa lo cual incrementa los rendimientos de la hidrólisis al incrementar el área superficial de la celulosa, modificando la composición física y química del residuo lignoceluloso. [4]

No obstante para llevar a cabo estos procesos se requiere de pretratamientos que pueden llegar a ser complejos, tales como reducción de tamaño, explosión con vapor, explosión con fibra de amonio, hidrotermólisis, entre otros. Igualmente se pueden encontrar una serie de desventajas como el alto costo de las enzimas y la escasa recuperabilidad de estas, como es el caso de la Hidrólisis ácida en el cual los procesos con ácidos pueden llegar a ser extremadamente peligrosos y corrosivos, siendo necesario manejar equipos resistentes a la corrosión y que tengan la capacidad de neutralizarse una vez termina el proceso, aumentando así costos en el proceso y promoviendo la formación de inhibidores como ácidos carboxílicos, furanos y compuestos fenólicos los cuales impiden el crecimiento microbiano de la fermentación. [5]

Alternativamente, durante los últimos años se ha venido estudiando la hidrólisis subcrítica. En esencia, este método consiste en poner agua a condiciones de temperaturas usualmente mayores a 200°C y presiones hasta de 2000 psi, con el material lignoceluloso. A estas condiciones el agua hidroliza fácilmente la celulosa y lignocelulosa, produciendo azúcares de 5 y 6 carbonos. [6] Las ventajas de este método en comparación con los convencionales son el no requerimiento de usar reactivos corrosivos, los rápidos tiempos de reacción y la práctica de pretratamiento de la materia prima. [5]

Las investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de La Salle con materias primas como la cáscara de arveja en un sistema Batch, mostraron que a 300°C, 15 minutos de tiempo de reacción y una presión de 3650 psi se obtiene un jugo fermentable con concentración aproximada de 22mg/L de azúcares reductores. [7]. De la misma forma, se llevó a cabo un estudio con pasto kikuyo en sistema semicontinuo, en el cual se obtuvieron los mejores resultados con caudales de 9 ml/min a condiciones de 300 °C y 2000 psi, dando

como resultado eficiencia del 22% de azúcares reductores.

Por otra parte estudios doctorales lograron por medio de un dispositivo experimental recuperar un 76% de productos derivados de hidrólisis (azúcares reductores) presentes en la materia prima utilizada en un tiempo de residencia, temperatura y presión que determina la conversión de celulosa y glucosa en dichos azúcares. Entre los resultados más sobresalientes, se observó que las cinéticas de hidrólisis de celulosa son mucho más rápidas que las reacciones de hidrólisis de glucosa. Esta diferencia se acentúa a temperaturas por encima del punto crítico del agua; igualmente se determinó que el efecto de la presión sobre las reacciones de hidrólisis de celulosa son menores que el efecto de la temperatura y el tiempo de residencia. Sin embargo, la presión juega un importante rol en la composición de los productos de hidrólisis. Un incremento en la presión producirá azúcares de mayor peso molecular. Por último se concluye que a una escala mayor, el prototipo del reactor utilizado en esta tesis doctoral usado como una alternativa energética para llevar a cabo el proceso de hidrólisis de biomasa con agua en condiciones supercríticas y tal vez subcríticas, puede llevarse a cabo sin requerimientos extras de calor o trabajo si el proceso se integra con una planta combinada de producción de calor y potencia.[9]

No obstante, otras investigaciones realizadas en un microreactor tubular donde se hizo un análisis cinético detallado de las reacción de hidrólisis en la celulosa y almidón con agua subcrítica manejando temperaturas subcríticas que van desde 270 hasta 340 ° C con tiempos de residencia en un rango de 0.40 a 0.88 s, mostraron una conversión máxima del 92,2% de la biomasa usada a unas condiciones de 320 °C, 5000 psig y un tiempo de residencia de 0,56 s, evidenciando que a mayor tiempo de residencia del agua en estas condiciones en el microreactor en contacto con la biomasa y a mayor temperatura de exposición, el porcentaje de conversión de celulosa va aumentando. [10]

Además el caso de la obtención de azúcares y proteínas del salvado de arroz utilizando el método de la termólisis hídrica a través de un sistema semicontinuo, en el cual se deduce que los tres factores principales son temperatura, tiempo y presión para obtener un efecto significativo en el rendimiento de obtención azúcar, mientras que el principal factor que influye en el rendimiento de proteína fue el tiempo de operación, con un efecto menor, pero significativo, de la interac-

ción entre la relación temperatura y tiempo. Los experimentos realizados en este estudio se podrían llevar a cabo para estudiar la viabilidad de usar el reactor semicontinuo o reactor continuo en estas condiciones propuestas. Además, la posibilidad de la producción de bioetanol a partir de los restos de salvado de arroz y salvado de arroz desengrasado sería investigado en las condiciones óptimas propuestas. [11]

Finalmente estas investigaciones abren paso a analizar gran cantidad de materias primas clasificadas para generar biocombustibles de segunda generación y llegar en cierto punto a crear a prototipos a gran escala o industriales los cuales sean eficientes y capaces de crear energía alternativa sustituyendo métodos convencionales perjudiciales para el medio ambiente. Por consiguiente esta investigación pretende realizar un estudio experimental de obtención de azúcares reductores a partir de los residuos lignocelulosicos de la cosecha de maíz, específicamente el amero o cascara de este; por medio de la reacción de hidrólisis bajo condiciones subcríticas en una unidad semi continua del laboratorio, con el fin de aportar al conocimiento del potencial energético de la biomasa y la mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos que muchas veces al no darles un aprovechamiento pueden impactar negativamente e indirectamente en la demanda de recursos naturales no renovables para generación y consumo de energía y en la vida útil de los sitios de disposición final de residuos sólidos por el volumen que pueden llegar a aportar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fase pre experimental

El material utilizado en el desarrollo del trabajo fue la cascara de Mazorca (*Zea mays* L.), también conocida como el amero de este, el cual se obtuvo en la plaza de mercado Paloquemao en Bogotá [4° 36' 58,733" N - 74° 5' 0,651" O], ya que este material es denominado como residuo agroindustrial al no tener ningún tipo de aprovechamiento. Esta materia prima fue expuesta a un pre tratamiento físico, el cual correspondió a un secado a temperatura ambiente durante 24 horas, esto con el fin de eliminar la humedad contenida en la materia prima. Dado el tamaño del reactor a utilizar, el cual tiene un diámetro de 0,93cm se redujo el tamaño con un molino analítico a partículas de 1-3mm. El material a utilizar finalmente tomo una textura fibrosa y de color opaco.

Figura. 1 Reducción del tamaño de la hoja de mazorca

Fase experimental

Corridas experimentales

Las condiciones de experimentación se seleccionaron de acuerdo con la revisión bibliográfica así como experimentos preliminares. En la tabla 1 se presentan los rangos de las variables estudiadas.

Tabla. 1 Rangos de las condiciones de los factores del desarrollo de la Hidrolisis térmica

Temperatura (°C)	Presion (psi)	Tiempo de Residencia (min)
250	1500	7
280	2000	12

Con el objetivo de evaluar el efecto combinado de los anteriores parámetros, se realizó un diseño factorial 2^k completamente aleatorio, del cual se determinó un diseño de 23 al manejarse 3 factores y 2 niveles de trabajo que corresponden a ALTO (+) Y BAJO (-), obteniendo como resultado 8 corridas experimentales.

Las corridas experimentales se realizaron en una unidad semi continua de reacción a condiciones sub y supercríticas construida en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y sanitaria de la Universidad de la Salle. Brevemente, la unidad consiste de un tanque de almacenamiento que contiene agua desionizada con el fin de alimentar el sistema a través de una bomba de alta presión Williams Milton Roy. Seguidamente la unidad contiene un sistema de precalentamiento e intercambiadores de calor, las cuales fueron construidas a partir de tuberías y accesorios de alta presión y resistencias eléctricas que fueron manejadas por medio de dos controladores de temperatura. Cabe mencionar que el sistema cuenta con cuatro termocuplas distribuidas en la unidad, encargadas de medir la temperatura, para obtener un mayor control de la temperatura de reacción. Además el sistema cuenta con un reactor tubular empacado, el cual contiene el material que será expuesto a las condiciones y finalmente tiene una válvula de despresurización con el fin de controlar la presión la cual está conectada a un recipiente de toma de muestras finales. En la siguiente imagen se visualiza el diagrama de la unidad semi continua.

Figura 2. Diagrama de la unidad semi continúa del laboratorio de la Universidad de La Salle.

El funcionamiento de la unidad semi continúa se basa principalmente en la remoción del reactor tubular empacado para colocar la cantidad de material que se utilizará en cada corrida, el cual correspondió de 1,5

g. Luego se monta el reactor tubular justo antes del intercambiador de calor conectándolo a la tubería de alimentación, teniendo en cuenta que no exista ningún tipo de fugas. Así mismo, a través de la bomba de alta presión se maneja a que caudal se bombeará el agua para que este llegue hasta el reactor tubular por medio de la tubería de alimentación del sistema. En una corrida típica, se bombea agua y se presuriza el sistema con la presión deseada en cada corrida, luego se empieza a calentar el sistema con ayuda de los controladores de temperaturas y las resistencias eléctricas, hasta que se llegue a la temperatura con que se realizara la corrida. Finalmente cuando se obtengan las condiciones deseadas tanto de presión como de temperatura, se empieza a bombear el sistema con el flujo obteniendo cada una de las muestras.

Figura 3. *Funcionamiento de la unidad semicontinua*

Medición de azúcares reductores por el método DNS

Luego de la exposición del material a las corridas con la combinación de los factores (Temperatura, Presión y Tiempo de residencia), se tomaron muestras por cada corrida durante 15 minutos en promedio, donde en cada minuto se recogió el producto final en tubos de ensayos los cuales fueron refrigerados con el fin de evitar la fermentación de los azúcares obtenidos.

Para la medición de azúcares reductores se utilizó el método DNS, basado en la reducción de este reactivo lo cual hace referencia al cambio de color durante su reacción. Para la preparación del reactivo se disolvieron 30 g de Tartato de Na-K en 30 ml de agua destilada caliente para obtener una disolución que se denominó solución 1. Seguidamente se disolvió 1 g de ácido 3,5 dinitrosalisílico en 30 ml de agua destilada a 45°C y se adicionó lentamente 1.6 g de hidróxido de Sodio hasta que se disolviera por completo, obteniendo la solución 2. Finalmente se agregó la solución 1 en la solución 2 gradualmente, luego se dejó enfriar y se aforó a 100

ml y se envaso en un frasco ámbar durante 24 horas para su posterior uso. Para la utilización del método DNS se hace necesario la construcción de una curva de calibración para relacionar. La absorbancia obtenida con la concentración de azúcares reductores, por lo anterior se preparó un patrón de glucosa el cual se basó en la disolución de 0,1g de Glucosa en 100 ml de agua destilada obteniendo un concentración 1 mg/ml.

Construcción de la curva de calibración

Luego de obtener el patrón de glucosa, se realizó la curva de calibración en donde se colocaban diferentes concentraciones a reaccionar con el reactivo DNS; estas concentraciones oscilaban desde 0,05 mg/ml hasta 1 mg/ml. Para el procedimiento de medición se tomó cada concentración de glucosa y se añadió 1 ml de reactivo DNS; seguidamente se coloca la muestra en el termoreactor NANOCOLOR a una temperatura de 100 °C durante 15 minutos, después se añade 1 ml de agua destilada y se deja reposar en la oscuridad en agua con hielo por 15 minutos. Finalmente se procede a medir en absorbancia de 540 nm con el espectrofotómetro NANOCOLOR 500 D obteniendo una ecuación de la curva sin olvidar que el ajuste de la ecuación debe ser mayor a 0,99. Lo anterior con el fin de establecer una relación entre absorbancia y concentraciones, ya que con la ecuación de la curva se logrará hallar la concentración de azúcares reductores que se obtuvieron en las corridas experimentales.

Calculo de azúcares reductores

Al obtener los productos de cada una de las 8 corridas que se realizaron, de las cuales se obtuvieron 12 muestras en promedio de cada corrida; se dispuso a medir la cantidad de azúcares reductores que se encontraron. Sin embargo, dadas las concentraciones altas se tuvieron que hacer varias diluciones que oscilaban entre 1:4, 1:10 y 1:20, con el fin de que las lecturas de las muestras se encuentren en el rango de lectura del espectrofotómetro NANOCOLOR 500D. Estas mediciones se hicieron de acuerdo al procedimiento que se mencionó anteriormente.

Para obtener los resultados finales se realizó un análisis a través de la eficiencia acumulada de cada una de las corridas realizadas, la cual se halló haciendo un paralelo entre la cantidad de azúcares reductores obtenidos en cada muestra y la cantidad de material que fue expuesto a la reacción durante la corrida, donde en cada muestra se fue sumando la cantidad de azúcar obtenida y luego se dividió entre el total con el fin de

conocer la eficiencia de cada corrida. La cantidad de azúcares reductores se halló por medio de la concentración de azúcares obtenidos a través de la ecuación de la curva que relaciona absorbancia y concentración de azúcares, y el volumen de cada una de las muestras que fueron medidos a través de una probeta. La ecuación (1) relaciona lo anteriormente dicho:

$$\%Eficiencia\ Acumulada = \frac{\sum \text{Peso Azúcares Reductores mg}}{\text{Peso Inicial de la muestra}} \times 100 \quad (1)$$

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de llevar a cabo la fase experimental y obtener los principales resultados, se registró que la mayor concentración de azúcares reductores se observó en la corrida N° 2, la cual se encontraba a condiciones de: Temperatura en rangos entre 280-290 °C, presión de 2000 psi y un caudal mínimo de 9 ml/min; obteniendo una eficiencia acumulada del 19%. No obstante, se observa que las eficiencias de las corridas experimentales van disminuyendo de acuerdo a la reducción del nivel de temperatura (235-245 °C) y al aumento del caudal, como ocurrió en el caso del estudio donde se uso una suspensión de celulosa cristalina como materia prima, dando resultados de eficiencias de un 30,4% a sus más altos niveles de temperatura (340 °C) [12] . Lo anterior, hace referencia que al tener un caudal menor que corresponde a 9 ml/min, el agua tendrá mayor tiempo de residencia o de contacto lo que asegura que exista un mayor tiempo de reacción entre el agua y el material a trabajar, y así se puede afirmar que la reacción de hidrolisis en las corridas con mayor eficiencia se desarrolló completamente.

Figura 4. Eficiencias acumuladas vs Tiempo (Corrida #2)

De acuerdo con la composición teórica que han reportado otros autores [13], la hoja de maíz tiene un porcentaje de celulosa que oscila entre el 27% y 37%, a pesar de que hay una pequeña cantidad de glucosa que se puede formar a partir de la hemicelulosa, es una buena aproximación suponer que la máxima eficiencia resultante es similar al contenido de celulosa contenido en esta materia prima. En este caso la máxima esperada sería 25%, sin embargo, teniendo en cuenta que existen procesos de descomposición, la mayor eficiencia obtenida en esta investigación fue del 19% (con respecto a la biomasa cargada en una corrida que conto con una duración de 22 minutos y 11 muestras como se observa en la figura 4.

Consiguiente a las condiciones de esta corrida, se considera la temperatura como un factor importante en la reacción de hidrolisis, ya que a mayores temperaturas que oscilaban en el rango de 280-290 °C, se obtendrá mayor cantidades de azúcares reductores en la reacción de hidrolisis. Lo anterior explica que el agua a una temperatura mayor, se adecua mejor a la desintegración de la pared vegetal del material mediante la separación de la mezcla entre la lignina y la celulosa contenida en la pared celular del material y la descomposición de polisacáridos tales como la hemicelulosa, la cual se encuentra en gran porcentaje en la composición química de la hoja de mazorca (Zea mays.) [13], en monosacáridos como la glucosa.

Tabla 2. Rango de porcentajes en la composición química de la hoja de maíz de polisacáridos.

Hemicelulosa (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)
25,29 – 35, 68	27,89 - 37,08	2,68 – 4,28

La presión es también un factor que conlleva una importancia significativa en el desarrollo experimental, ya que al exponer el material a presiones altas tales como las trabajadas, el agua se expone a una fase subcritica, lo que indica que la línea de separación líquido- gas se interrumpe, es decir, se genera una sola fase la cual comparte propiedades tanto de fases de líquido y gas; cuando el agua se expone a temperaturas altas después de haber sido expuesto a presiones altas, hace que el agua se comporte como un fluido subcritico facilitando la reacción de hidrolisis térmica. Lo anterior significa que el agua a condiciones subcriticas durante reacciones orgánicas funciona como agente de extracción.

No obstante se logra identificar que las condiciones a las cuales se obtuvieron eficiencias máximas con diferente biomasa son similares. Cabe resaltar que para

realizar una confrontación de resultados con otras investigaciones se debe tener en cuenta que cada materia prima usada en los diversos estudios poseen una composición química diferente en lo que se refiere a porcentaje de hemicelulosa, lignina, celulosa y otros compuestos que permiten la obtención de azúcares reductores. Esta variable influye bastante en los resultados obtenidos desde un inicio.

Finalmente a comparación con estudios en donde el análisis cinético de la reacción de hidrólisis es más detallado [9], [10], [12], se observa que el porcentaje de conversión no es muy alto, sin embargo se diferencia que en las otras investigaciones el nivel de pureza de la biomasa y las condiciones del reactor que permite la reacción química es diferente, factores que influyen este porcentaje de eficiencia de obtención de azúcares reductores. En términos generales la investigación arroja resultados estables en cuanto a los estudios realizados anteriormente en el mismo reactor con otras materias primas, en este caso se obtuvieron resultados máximos de 19,10% y 18,45% de azúcares reductores con hoja de maíz, en la investigación realizada con pasto kikuyo se obtuvo un máximo de 22%.

CONCLUSIONES

Las mayores eficiencias reportadas en lo que corresponde a azúcares recuperados de la materia prima fueron del 19,10% y del 18,45%; eficiencias obtenidas en el nivel alto de temperatura y nivel bajo de caudal, variando entre ellas la presión que fue 1500 psi y 2000 psi correspondientemente, es decir, la temperatura y el caudal fueron las variables más importantes en la obtención de azúcares reductores de la hoja de maíz. La temperatura y el tiempo de contacto del agua con la materia primada por el caudal de operación para la hidrólisis son variables que permiten la descomposición de la lignocelulosa encontrada en la pared a altas temperaturas en monómeros de azúcares reductores. La presión no mostró tener un efecto apreciable sobre las cinéticas de producción de azúcares. La hidrólisis subcrítica por sistema semicontinuo permitió obtener resultados a menor escala de una materia prima poco investigada y con alto contenido lignoceluloso como lo es la hoja de maíz, esto permite abrir campo a nuevas investigaciones en diferentes condiciones de operación experimental y con diferente granulometría de la materia prima para poder obtener resultados más óptimos para estructurar ideas a mayor escala o industrialmente para el aprovechamiento de este residuo y posterior obtención de bioetanol.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Sttrata, «BIOCOMBUSTIBLES: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel,» Argentina, 2000.
- [2] T. Zamora-Hernández, A. Prado-Fuentes, J. Capataz-Tafur, B. E. Barrera-Figueroa y J. M. Peña-Castro, «Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales,» Educación química para un futuro sostenible –Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.
- [3] R.E Quiroz, et al “Lignocelulosa como fuente de Azúcares para la producción de Etanol.” *Bio Tecnologia*, vol. 13 no. 3. pp. 11-13, 2009.
- [4] Islas., J. (2012). Obtención de azúcares fermentables mediante hidrólisis ácida de Beta Vulgaris L.
- [5] Tahrzadeh, M & Karimi K « Pretreatment of lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas production, » *International Journal of Molecular Science*, 2008.
- [6] J. Fernández, et al. “Biocarburantes de segunda generación” en *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*, ed. Mundi-Prensa, 2015, cap. 13, pp.
- [7] I. G. Ávila, «Estudio experimental para la obtención de azúcares reductores a partir de la vaina de *pisum sativum* L. (arveja) mediante hidrólisis en agua supercrítica,» Facultad de Ingeniería- Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia , 2016.
- [8] Prado, A. B. «Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulosicamixta.» *Madera Y Bosques*. 2012
- [9] Cantero, D, «Intensificación del Proceso de Hidrólisis de Celulosa para la Obtención de Productos de Valor Añadido mediante el uso de Agua Supercrítica.»- Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente – Universidad de Valladolid, 2014.
- [10] Olanrewaju, K, «Reaction kinetics of cellulose hydrolysis in subcritical and supercritical water - Capítulo 4, *kinetics analysis of cellulose reaction in subcritical and supercritical water*» University of Iowa, 2012.
- [11] Sunphorka, Sasithorn; Chavasiri, Warinthorn; and Oshima, Yoshito, K, «Protein and Sugar Extraction from Rice Bran and De-Oiled Rice Bran using Subcritical Water in a Semi-Continuous Reactor: Optimization by Response Surface Methodology » University of Iowa, 2012.

[12] K.B. Olanrewaj, "Reaction kinetics of cellulose hydrolysis in subcritical and supercritical water" Ph.D Theses and Dissertations, University of Iowa, Iowa, USA, 2012.

[13] A.L. Amador, "Fenología productiva y nutricional de maíz para la producción de forraje", *Agronomía Mesoamericana*, vol. 11, no. 1, pp. 171-177, 2000.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESAMIENTO DE LLANTAS USADAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN CONDICIONES DE ALTA PRESIÓN Y TEMPERATURA

Vera Hostos, Angie Lizeth¹
Marulanda Cardona, Victor¹

¹ Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle
vangie05@unisalle.edu.co, vfmarulanda@unisalle.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

En la actualidad se presenta en la ciudad de Bogotá una seria problemática causada por la generación de más de 18.000 toneladas de llantas usadas al año, las cuales representan un componente de contaminación ambiental e impacto a la salud a gran escala debido a su corta vida útil y a los inadecuados procesos de disposición final que se llevan a cabo. Durante los últimos años se han venido realizando estudios de aplicación de la tecnología de transesterificación supercrítica para la producción de biocombustibles a partir de distintas grasas y aceites, debido a las condiciones de temperatura y presión extremas que se usan, estos estudios han evidenciado la ocurrencia de distintos tipos de reacciones que incluyen cracking térmico e hidrogenación similares a las que utilizan algunos procesos industriales que aprovechan las llantas usadas con fines energéticos. Por tal razón en este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental exploratorio del procesamiento de llantas usadas en la producción de biodiesel en condiciones supercríticas con el fin de obtener un biocombustible que potencialmente ofrezca mejores propiedades en cuanto a contenido energético, viscosidad y fluidez que el biodiesel obtenido via transesterificación de aceites y alcohol. A tal fin se realizaron estudios en un reactor batch y semicontinuo a diferentes condiciones de temperatura, presión y tiempo de residencia, buscando determinar la factibilidad de disolver completamente la llanta en el biocombustible producido de manera que se facilite al mismo tiempo su utilización. Los resultados mostraron que a 400°C, una relación 15:1 alcohol/triglicéridos y un tiempo de 20 minutos en un reactor batch fue posible disolver toda la llanta en el biocombustible producido, el cual consistió de una sola fase con baja viscosidad. Se encontró un contenido de productos volátiles posiblemente derivados tanto de la llanta como el biocombustible de más del 60% por medio de destilación fraccionada en laboratorio.

Palabras claves: Procesamiento, Llantas usadas, Transesterificación Supercrítica, Biocombustible.

INTRODUCCIÓN

En Colombia se producen 2.5 millones de neumáticos al año, de los cuales 750000 llantas se desechan en las calles, las consecuencias son de salubridad pública y de contaminación ambiental [1], en cuestiones de salud pública, el esparcimiento que tienen estos objetos en los diferentes lugares de la ciudad genera la reproducción de plagas y enfermedades vectoriales. El caucho del neumático es una amenaza potencial para el medio ambiente al ser un material de no biodegradación ni de fácil descomposición, además de estar acompañado de múltiples químicos [2].

Las llantas usadas son un residuo sólido que en el país presenta escasa valorización, a pesar de que existen tecnologías como el coprocesamiento en hornos cementeros u otras tecnologías térmicas como la pirolisis, para aprovechar su contenido energético, estas no han sido implementadas a gran escala, por lo que los usos más comunes incluyen la incorporación a materiales de construcción, artículos artesanales o juegos infantiles, los cuales no pueden hacer un uso importante de la mayor cantidad del residuo [3].

Por otro lado, algunos estudios han abordado el procesamiento de las llantas usadas por medio de fluidos en condiciones supercríticas como una alternativa a los procesos tecnológicos convencionales de coprocesamiento. Por ejemplo, Bhatti y colaboradores evaluaron la descomposición de las llantas usadas empleando tolueno a temperaturas de 300°C y presiones de 500 a 800 Psi, encontrando que aproximadamente 94,2% de la llanta fue descompuesta, produciendo un aceite con hidrocarburos de peso molecular inferior a 300 [4]. De forma similar Onsri y colaboradores estudiaron la coliquefacción del carbón y las llantas usadas empleando agua supercrítica, evaluando la máxima conversión y productividad del aceite, la cual correspondió a 57 y 60% a 400°C y 80% de llanta usada [5]. En el estudio de la producción de biodiesel a condiciones supercríticas Marulanda y colaboradores reportaron la ocurrencia de reacciones de cracking e hidrogenación de los etil esteres insaturados produciendo alcanos entre 8 y 14 carbonos, así como etil esteres de cadena corta y productos de descomposición del glicerol, lo cual se atribuyó a las condiciones de reacción agresiva [6]. Este tipo de reacciones son similares a las que tienen lugar en los procesos de coprocesamiento de llantas usadas.

Por tal razón en este trabajo se estudia el procesamiento de las llantas usadas en la producción de biodiesel en condiciones supercríticas, con el fin de evaluar la factibilidad técnica de obtener un biocom-

bustible enriquecido con los productos que pueden generarse de la descomposición de las llantas a estas condiciones, de manera que se incorpore su contenido energético en el biodiesel producido y se facilite su utilización. A tal fin se realizaron estudios en un reactor batch y un reactor semicontinuo a diferentes condiciones de temperatura, presión y tiempo de residencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Llanta Usada

La llanta triturada en un tamiz de 1,7 milímetros se obtuvo en una empresa del sector industrial de Fontibón que ofrece Grano de Caucho Reciclado a industrias encargadas de la fabricación de asfalto y canchas sintéticas.

Figura 1. Llanta triturada adquirida

Equipo Experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en una unidad batch y en una unidad semicontinua. La unidad batch se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Unidad Batch del Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle

La unidad batch consiste en un reactor tubular marca *Swagelok* de ½(in) de diámetro y 15cm de largo; en dicho reactor se carga el alcohol, el aceite y una cantidad de llanta usada que se varió entre el 5% y el 10%, posteriormente se cierra el reactor de acuerdo con lo establecido en el manual del producto [7] y se inicia el calentamiento hasta la temperatura de 400°C midiendo la presión en el manómetro, una vez transcurre el tiempo de reacción que se determinó en 20 minutos después de haber alcanzado la temperatura máxima de reacción se remueve el reactor y se deja enfriar a temperatura ambiente.

La unidad semicontinua consta de una entrada de aire comprimido junto con su controlador, dos tanques de almacenamiento de materias primas, aceite y alcohol, que alimentan el sistema a través de una bomba de alta presión marca *Williams Milton Roy*. Seguidamente la unidad contiene un sistema de precalentamiento e intercambiadores de calor, los cuales fueron contruirdos a partir de tuberías y accesorios de alta presión marca *Swagelok* suministradas por la Universidad de La Salle.

Cabe mencionar que el sistema cuenta con cuatro termocuplas tipo K distribuidas en la unidad, encargadas de medir la temperatura, de tal forma que se tenga un mayor control durante la reacción. Además el sistema cuenta con un reactor tubular empacado, el cual contiene la llanta triturada, en las conducciones de salida el sistema cuenta con una válvula de despresurización que permite controlar la presión, la cual se encuentra conectada a un recipiente de toma de muestras finales. En la figura.3 se visualiza el diagrama de la unidad semicontinua.

Figura3. Diagrama de la Unidad Semicontinua del Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle

Métodos de Análisis

Se usó una aproximación cuantitativa y una aproximación cualitativa para medir los resultados de los experimentos. Cualitativamente se buscó obtener un

biocombustible donde toda la llanta empacada pasara a ser parte de la fase líquida sin dejar un residuo sólido en el reactor, de igual forma se buscó que no se formaran grumos o se sedimentará después de cierto tiempo la fracción obtenida de la llanta usada en el biodiesel producido. Por otro lado, en una de las corridas realizadas en el reactor semicontinuo, se llevó a cabo una destilación fraccionada de laboratorio, con el fin de separar la fase ligera de la fase pesada.

Figura 4. Montaje del equipo de destilación fraccionada del laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de La Universidad de La Salle

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Reactor Semicontinuo

En cuanto a los resultados experimentales obtenidos en las tres corridas realizadas en el reactor semicontinuo, se presentaron problemas, ya que la corrida empieza y transcurre durante un cierto periodo de tiempo que permite recolectar una cantidad significativa de muestra, no obstante, después de la fase de transición las partículas de llanta triturada van reduciendo su diámetro de tal forma que se logran escapar del reactor taponando las conducciones de salida del intercambiador del mismo y la válvula de despresurización, lo cual genera un aumento en la presión y en algunos casos conlleva a una explosión del material previamente empacado. En la Tabla 1, se presenta el resumen de las corridas experimentales llevadas a cabo en dicha unidad, especificando las condiciones de reacción y la descripción cualitativa de los resultados obtenidos en cada caso.

Tabla 1. Relación de las corridas experimentales realizadas en el reactor semicontinuo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle

FASE EXPERIMENTAL PRELIMINAR						
FACTORES EXPERIMENTALES					RESULTADOS	
Número de Corrida	Gramos de materia prima (g)	Temperatura (°C)	Presión (Psi)	Relación Molar	Imagen	Descripción
1	2,24	380	3000	9:1		En la primera corrida experimental se obtuvieron cuatro muestras, en las cuales aparentemente a medida que transcurre la reacción se va presentando un cambio en la coloración, lo cual se atribuye a la fase en la que diversos compuestos están pasando de la llanta hacia el biocombustible producido; además se recolectaron dos muestras, una de la fase transitoria y otra de recolección general.
2	2,24	430	3200	9:1		En la segunda corrida experimental se obtuvieron cinco muestras, en donde se puede observar una fase de un biocombustible y una suspensión de partículas negras muy finas; además se obtuvo una recolección de la fase transitoria y una recolección de color negro, en donde se observan las partículas de la llanta triturada de menor diámetro, lo cual se atribuye a un material carbonoso.
3	3,12	440	4000	9:1		En la tercera corrida experimental, se obtuvo un producto con mayor cantidad de material negro suspendido de diámetro considerable, debido a que durante dicha fase ocurrió una caída de presión, que impidió continuar con la corrida.

En general, se puede observar que inicialmente, cuando el lecho empieza a calentarse la muestra obtenida en la recolección corresponde al biodiesel, sin embargo, una vez se alcanza la temperatura de reacción la llanta usada empieza a salir como parte del biodiesel. Cuando la corrida transcurre de forma normal se obtiene un biodiesel de color negro como el que se observa en la corrida número 3.

Con el fin de identificar la formación de productos volátiles que puedan generarse tanto de la llanta usada, como de reacciones de cracking térmico y pirolisis, se realizó la destilación fraccionada a partir de la muestra de recolección general de la corrida 1, observando que se obtuvo un contenido de fase volátil hasta 120°C de más del 60% en peso respecto a la muestra inicial; con este resultado se puede concluir que la muestra no es biodiesel debido a que este tiene un punto de ebullición superior a 300°C, y a su vez, tampoco hace referencia al alcohol sin reaccionar ya que en la relación de volúmenes la cantidad de alcohol suministrada en el tanque era inferior al 60%. Con el transcurso de la destilación se presentó una descomposición de la

fase pesada por la alta temperatura originando como resultado un cambio de color, como se puede observar en la figura.5.

Figura.5 Resultado de la destilación fraccionada de laboratorio fase ligera y pesada

Reactor Batch

Las corridas experimentales en el reactor batch se llevaron a cabo a temperaturas de 400°C y diferentes relaciones molares con el fin de evaluar la solubilidad de la llanta usada en el biodiesel y evitar al máximo la descomposición del mismo. Para ello se emplearon las condiciones de reacción que se han encontrado como optimas en los estudios anteriores realizados en la Universidad de la Salle, los cuales indican que a temperaturas mayores a 400°C se puede presentar una alta descomposición del biodiesel [8].

En la figura 6 (a), se observa la corrida número 1, llevada a cabo con relación molar 9:1, en donde toda la llanta usada paso a ser parte del biocombustible, sin embargo, en el reactor quedo un remanente de grumos, lo cual puede atribuirse a que la cantidad de biocombustible presente es insuficiente para disolver todos los productos que se formaron de la llanta. Por tal razón se aumentó la relación molar a 15:1, observando que toda la llanta usada paso a formar parte de la solución, lo cual indica que hay una mayor cantidad de biocombustible que permite disolver la llanta, como se observa en la figura 6 (b), la muestra tiene una sola fase, no presenta sedimentación, tiene una baja viscosidad y un olor característico a hidrocarburo, con lo que se determinó que estas fueron las mejores condiciones de producción de biodiesel. Teniendo en cuenta que diversos estudios han sido realizados para la producción de biocombustible a condiciones de temperatura y presión similares a las utilizadas en este estudio, conviene resaltar que en dichas investigaciones no se ha reportado el procesamiento simultaneo de la llanta usada en la producción de biodiesel a dichas condiciones

Figura 6. (a) Muestra obtenida en la corrida 1 y (b) Muestra obtenida en la corrida 2, realizadas en el reactor batch

CONCLUSIONES

Se realizaron experimentos tanto en reactores semicontinuos como batch buscando las condiciones de reacción que permitieran un procesamiento simultáneo de la llanta de manera que esta pasara a ser parte del biocombustible y permitiera el aprovechamiento de su contenido energético. Los experimentos realizados en el reactor semicontinuo mostraron que la fase de biodiesel producida por llanta usada tiene un contenido de productos volátiles hasta del 60%, lo cual indica que hay una elevada formación de estos productos que se generan de la llanta o del biodiesel. Por otro lado, las corridas realizadas en reactores batch mostraron que las mejores condiciones de reacción fueron a temperaturas de 400°C y relaciones molares de 15:1, en donde toda la llanta paso a formar parte del biodiesel producido, es decir, que esta no se precipito y el biocombustible obtenido presento ventajas, tales como una baja viscosidad y un olor característico a hidrocarburos. Estudios posteriores se realizarán con el fin de caracterizar el biocombustible producido en términos de conocer los productos específicos que se están formando tanto en la fase ligera como en la fase pesada, así como el poder calorífico del biocombustible producido enriquecido con la llanta. Finalmente, se concluye que la tecnología estudiada se perfila como un proceso tecnológico alternativo para el procesamiento de las llantas usadas de manera que el contenido energético de estas pueda ser usado con mayor facilidad en procesos de combustión sin necesidad de hacer modificaciones sustanciales a los equipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. d. C. d. Bogotá, «Guía para el manejo de llantas usadas,» Kimpres Ltda., Bogotá, 2006.
- [2] M. A. Serrano, «Proyecto de adecuación de parques con el uso de llantas recicladas en la ciudad de Bogotá,» UNAD, Bogotá, 2015.
- [3] Departamento Ambiental y Empresarial, «Unión Temporal OCDE Ltda,» 2011. [En línea]. Available: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>. [Último acceso: Julio 2016].
- [4] K. Q. y. H. A. Z. Inamullah Bhatti, «Supercritical Decomposition of Scrap Tires using Toluene,» Thermal Engineering and Enviroment, p. 4, 2010.
- [5] P. P. y. S. N. Kwanruthai Onsri, «Co-liquefaction of Coal and Used Tire in Supercritical Water,» Energy and Power Engineering, p. 8, 2012.

[6] G. A. y. L. L. T. Victor F Marulanda, «Investigations of Supercritical transesterification of chicken fat for biodiesel production from low cost lipid feedstocks.,» The Journal of Supercritical Fluids, pp. 53-60, 2010.

[7] Swagelok, «An installer's pocket guide for Swagelok,» Swagelok Company, USA, 2014.

[8] Y. B. y. N. Ramirez, «Estudio experimental de la utilización del sebo vacuno para la producción de biodiesel por medio de transesterificación supercrítica,» Universidad de La Salle, Bogotá, 2013.

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DE SEDIMENTOS (HAZE) GENERADOS EN EL BIODIESEL

Hernández Martínez, Andrea Lorena¹
Mayorga Betancourt, Manuel Alejandro²

¹ Empresa Biodiesel de la Costa S.A.S.
² Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME
Universidad ECCI
¹alhm17@hotmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

El biodiésel, producido por BIODIÉSEL DE LA COSTA S.A.S., presenta un problema de precipitación de material insoluble a condición ambiente e incluso a temperaturas cercanas al punto nube, produciendo daños en la superficie y la calidad del producto. Inicialmente, se determinan las condiciones presentes en la empresa y la caracterización fisicoquímica (ASTM) de la materia prima y del biodiesel, para conocer las variables y postular así cuatro alternativas viables de proceso que disminuyan los sedimentos en el biodiésel. Posteriormente, con el criterio de identificar componentes eficientes a menor costo, se evalúa en cada propuesta: materia prima, costos de inversión de equipos-materiales y tiempo de duración, seleccionando el proceso de purificación por filtración en frío. Finalmente, la caracterización del producto final, mostró que la filtración en frío a 18°C y 24 h con ayudante filtrante, la concentración de contaminantes totales se reduce en un 59% logrando biodiésel de mejor calidad.

Palabras clave: Biodiesel, Contaminantes, Esterilglucósidos, Haze.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria generadora de combustibles renovables afronta grandes retos en cuanto a la productividad de su sistema y calidad de producto terminado, debido al creciente desafío que exige competitividad para así abrir su participación en el mercado. El primer paso para mejorar la eficiencia es eliminando todos aquellos puntos que limitan y dejan en desventaja el producto frente a la competencia [1].

El biodiesel de la empresa BIODIESEL DE LA COSTA, tiene la necesidad de encontrar alternativas para la disminución o eliminación de los sedimentos haze [2], los cuales han sido en los últimos años la preocupación de la industria de biocombustibles, y debido a la carencia que presenta esta industria resulta importante desarrollar investigaciones que aportan a la evolución del biodiesel. De la misma manera es relevante que el biodiésel por ser un combustible renovable sea un producto ampliamente conocido y que no genere impactos significativos en la operación de motores. Por eso es necesario realizar este tipo de proyectos que favorecen las industrias, realizando mejoras en el proceso y en la estandarización de calidad del biodiesel [1].

Para mejorar la calidad del biodiésel en el aspecto anteriormente mencionado, se han propuesto como posibles alternativas: un proceso de enfriamiento seguido de una membrana para el filtrado [3], empleo de clarificantes [4], hidrólisis de enzimas [5] y destilación al vacío [6]; además es indispensable reconocer las variables que alteran la estabilidad del biodiesel. Entonces, es necesario identificar la alternativa más eficiente, ofreciendo una opción de bajo costo y con una calidad competitiva en el mercado.

De esta manera, lo que se busca es desarrollar una propuesta para la disminución de los sedimentos (haze) generados en el proceso de fabricación de biodiesel de la empresa Biodiesel de la Costa. Para lo cual es necesario conocer y determinar las condiciones generales y detalladas de la empresa, su proceso de producción, y las variables que afectan la formación de haze, adicionalmente caracterizar la materia prima y el biodiesel recién producido y con 60 días de haberse producido, comprobando que mediante la caracterización de materia prima y biodiesel, es necesario realizar un proceso posterior a la fabricación del combustible, exponiendo que las materias primas entran con condiciones adecuadas según las normas establecidas sin requerir ningún tipo de tratamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización materia prima y producto

Aceite Vegetal: se realizó la determinación de ácidos grasos libres (norma AOCS ca 5a-40), contenido de humedad, índice de yodo (NTC 283), punto de fusión (NTC 213).

Alcohol: se revisó el certificado de calidad suministrado por la empresa C.I.ACEPALMA basados en métodos ASTM para contenido de agua, gravedad específica, color, acidez, impurezas carbonizables.

Catalizador: el metilato de sodio es suministrado por DISINCO LTDA. Y para una disolución al 30% se verificó la humedad y la composición másica.

Biodiésel: para el B100 recién producido y a 60 días de producido se determinaron propiedades como densidad, punto final de ebullición, viscosidad cinemática, contenido de humedad, contaminantes totales, índice de yodo, contenido de glicerol libre y total, contenido de mono-.di-.triglicéridos, contenido de metanol (norma EN 14110), contenido de metilésteres (EN 14103).

Selección de Alternativas

Se realizó una matriz de selección de costos de inversión tanto en materias primas, reactivos y equipos enfocados en los parámetros de requerimientos de materia prima, costos de inversión y tiempo de duración para cada una de las propuestas. Se selecciona el costo menor de las cuatro opciones planteadas, que es la filtración en frío.

Desarrollo Experimental

En la Figura 1 se muestra el diagrama bloques del método seguido en el desarrollo experimental del proyecto.

Figura 1. Diagrama de bloques de desarrollo experimental

Se usó un diseño de experimentos de dos factores: la temperatura con tres niveles (10, 24 y 32°C) y el tiempo dos niveles (0 y 24 h); se realizaron tres replicas por ensayo, es decir 6 experimentos con 3 replicas para un total de 18. La variable de respuesta son los contaminantes totales. Posteriormente con los datos obtenidos se realiza un análisis de varian-za.

Proceso de obtención de biodiesel por medio de transesterificación

Se realizó con base en seis (6) etapas como se muestra en la Figura 1. Las cantidades de materias primas utilizadas fueron para obtener 500 ml de bio-diesel. Adicionalmente se describió la cantidad que se usó de ayudante filtrante para el proceso de filtración en frío.

Aceite vegetal: Se emplearon 105 g aceite refinado, blanqueado, desodorizado (RBD) y 313 g de estearina de palma que representa el 25% y 75% respectivamen-te de la totalidad en masa de la materia prima.

Metanol: La cantidad de metanol es dependiendo de la relación molar de alcohol/aceite (6:1) que se ma-neja en la planta, que en este caso es 76 g.

Metilato de sodio: La cantidad de catalizador usado es de acuerdo a la formulación de la empresa, se usó 5,7 g.

Tierras diatomeas: Se usó del ayudante filtrante el 0,1% [3] en masa de la cantidad de biodiesel que se filtró.

Las siguientes condiciones se mantuvieron cons-tantes: La temperatura de reacción (70°C), Agitación constante (200 rpm), Presión atmosférica (1 atm), Tiempo de residencia (1.5 horas), Reacción molar al-cohol/aceite (6:1), Temperatura de secado (160°C).

Determinación de contaminantes totales

En el proceso de obtención de biodiesel se generan sustancias no disueltas, referidas como contamina-ción total, en destilados medios como el FAME puro. Esta medición se determina a través de los contami-nantes totales. Para su determinación se sigue la Nor-ma EN 12662-08 [7].

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se muestran los resultados y los análisis de las pruebas realizadas a nivel laboratorio, como la con-centración de contaminantes totales y caracterización final de biodiesel.

Contaminantes totales de biodiesel

En la Tabla 1 se muestra la concentración de con-taminantes totales para cada una de las experimenta-ciones.

Tabla 1. Contaminantes Totales para cada muestra obtenida.

No. Expe-rimento	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Total	Promedio
	Contami-nantes Totales (mg/kg)	Contami-nantes Totales (mg/kg)	Contami-nantes Totales (mg/kg)		
1	9,4	9,5	9,7	28,6	9,53
2	15,4	15,3	15,7	46,4	15,47
3	45,3	45,7	45,4	136,4	45,47
4	8,5	8,6	8,3	25,4	8,47
5	11,3	11,8	11,4	34,5	11,50
6	23,9	22,9	23,5	70,3	23,43

La concentración de contaminantes totales de bio-diesel según la norma UNE-EN 12662, debe encon-trarse con una concentración menor a 24 mg/kg, los contaminantes totales determinan la cantidad de sedi-mentos insolubles presentes en el biodiesel, y la remo-ción de estos mejora la calidad del producto.

En las tres réplicas del experimento No. 3, sobrepasa el valor de la concentración de contaminantes to-tales del Biodiesel, eso debido a que el proceso llevo a cabo a temperatura ambiente e inmediatamente se procedió a filtrar el producto, por lo que no se alcanza-ron a formar los haze y por el de el resultado fue nega-tivo al obtener demasiados contaminantes en el pro-ducto. Se observa que continúa la formación de haze en la muestra y que con el tiempo aumentó la cantidad de contaminantes.

En la Tabla 1 se observa las tres réplicas de acuerdo al número de experimentos realizados, donde se evi-denció lo anteriormente mencionado. Por otro lado se denota que el experimento con menos concentración de contaminantes es el cuatro que tiene un promedio 8,47 mg/kg de contaminantes totales. No olvidar que el límite de la Norma UNE-EN 12662 es máximo 24 mg/kg (24 ppm) de contaminantes totales.

Por medio de los resultados se puede comprobar que a menor temperatura y mayor tiempo de formación de haze en el biodiesel, se obtienen mejores resultados en la concentración de contaminantes. Por lo tanto en lo acordado en la experimentación se recomienda realizar el proceso de filtración en frío a una temperatura de 18°C, y el tiempo de espera para la formación de haze de 0 horas, con el fin de obtener menor concentración de contaminantes totales presentes en el biodiesel en periodos cortos.

La empresa actualmente trabaja con 24 horas para la formación de los sedimentos para proceder con la filtración, el objetivo es disminuir sedimentos de biodiesel y de igual forma el tiempo de producción del combustible. No obstante se recomendó la experimentación No. 1, la cual se procedió a caracterizar.

Caracterización final de Biodiesel.

Elegida las variables de operación para la purificación de biodiesel por el proceso de filtración en frío. Se envió la muestra a un laboratorio externo donde se realizó la certificación de análisis del producto. Los resultados de las principales pruebas de caracterización de la muestra se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de Biodiesel final.

Pruebas	Requerimientos	Biodiésel Final	Biodiésel Inicial
Contenido de Humedad (ppm)	500 máx.	145	460
Contaminación Total (ppm)	24 máx.	9,60	23,5
Contenido de Monoglicérido (% masa)	0,8 máx.	0,602	0,694
Contenido de Diglicéridos (%masa)	0,2 máx.	0,175	0,200
Contenido de Triglicérido (%masa)	0,2 máx.	0,183	0,200
Contenido de metanol (%m/m)	0,2 máx.	0,05	0,07
Contenido de Metilésteres (%m/m)	96,5 mín.	97,8	96,9

Estos resultados fueron comparados con los requerimientos de la Norma ASTM D6751 [8] y con un de los biodiesel anteriormente caracterizados. Se realizó con el biodiesel recién producido. Se evidencia que el porcentaje de ésteres es mayor 0,9 % en el biodiesel después de una filtración en frío, usando la temperatura de 18°C para permitir la formación de haze y un tiempo de

0 horas obteniendo un valor de contaminantes totales de 9,6 ppm (mg/kg) y un contenido de ésteres metílicos de 97,8 % m/m.

Se tienen reportes, que en muestras industriales se ha encontrado que para biodiesel de palma la concentración de esterilglucósidos libres está en el rango de 55 a 275 mg/kg, donde el valor más bajo fue obtenido después de filtrar el diésel con un filtro de mangas con 10 micras de diámetro de poro. Para muestras preparadas a escala de laboratorio dicha concentración están entre 15 y 62 mg/kg [9]. Es decir que el contenido de contaminantes totales del biodiesel final en el caso del presente estudio es menor a los valores reportados en la literatura.

El biodiesel de estearina palma y RBD obtenido en este trabajo cumple con las normas ASTM y tiene mejores resultados posterior al tratamiento realizado, lo que indica la validez de la aplicación de un proceso adicional dentro de la fabricación de biodiesel. De igual forma los dos biodiesel comparados en la Tabla 2 están dentro de los parámetros por las normas ya mencionadas anteriormente. Sin embargo, los resultados del biodiesel final demuestran que se obtiene un producto con mayor calidad, disminuyendo los sedimentos significativamente, cumpliendo así el objetivo de desarrollar la propuesta más adecuada a las condiciones de la empresa.

CONCLUSIONES

Por medio de un diagnóstico se obtuvieron las condiciones de la empresa, las causas por las que se ve afectado el porcentaje de FAME perjudicando la calidad del biodiesel, demostrando que la temperatura ambiente y el tiempo de 24 horas son las principales variables que aquejan este fenómeno. Por medio de la caracterización de materia prima se determinó que no era necesario un pre-tratamiento, presentando las mejores condiciones para ser utilizado en la producción de biodiesel, bajo las condiciones de las normas establecidas. Por otra parte se compararon dos biodiesel, el primero un biodiesel con 60 días de producido y el segundo recién producido (3 días aproximadamente), a estos se les realizó una caracterización y se detectó que el biodiesel entre más tiempo lleve en reposo aumenta la formación de haze, encontrando una concentración de contaminantes mayor en el de 60 días de producido. Mediante un análisis costos de insumos, materiales y equipos proporcionados por proveedores se seleccionó la alternativa de filtración en frío, siendo esta la que mejor se acomoda a las necesidades que actualmente requiere la planta, ofreciendo costos más

bajos, reducción de tiempo de decantación y una fácil manipulación para los operarios al no usarse sustancias peligrosas. Con el análisis de varianza realizado con un 5% de significancia, se determinó el efecto que existe entre los factores con la variable respuesta, comprobando la interacción entre factores que afectan la formación de haze, determinado por la concentración de contaminantes totales expresada en mg/kg. Se logró que el biodiesel con mayor concentración de contaminantes totales se estabilizara a una temperatura de 32°C y en un tiempo inferior a una hora, obteniendo 45,5 ppm de contaminantes. En el biodiesel con menor contaminación total, se realizó a una temperatura de 18°C y un tiempo de formación de 24 horas teniendo como resultado una concentración de contaminantes 8,47 ppm en promedio con las réplicas realizadas. Se pudo comprobar que mediante la filtración en frío con ayudante filtrante, se obtiene menor concentración de contaminantes totales, proporcionando temperaturas bajas cercanas al punto de nube, para acelerar el proceso de formación de haze. El uso de ayudante filtrante garantizó un brillo y una traslucidez al producto, teniendo mejor apariencia. Por medio de la caracterización final se obtuvo un combustible con mejores condiciones que el anteriormente obtenido en la planta, reduciendo la concentración en 14 mg/kg aproximadamente, es decir un 59%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] C. A. Cardona Alzate, «Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos

latinoamericano y mundial,» *Revista de Ingenieria*, n° 29, pp. 109-120, 2009.

[2] D. T. M. Wilharm, «Sedimentos que afectan la calidad,» vol. Vol. 31 , n° Especial, Tomo II, 2010.

[3] M. F. R. E. G. Danzer, «Biodiesel cold filtration process». Estados Unidos Patente EP 1 829 853 A2, 05 Sep 2007.

[4] O ' Brien; Timothy J;Morgan; Waynn C.;Schield; John A., «Patens.com,» BAKER HUGHES INCORPORADO, 6 6 2008. [En línea]. Available: <http://es.patents.com/us-20090300975.html>. [Último acceso: 29 04 2015].

[5] Andres Aguirre , Salvador Peiru , Florencia Eberhardt, «Enzymatic hydrolysis of steryl glucosides, major contaminants of vegetable oil-derived biodiesel,» 2013.

[6] W. D. Morgan, «VACUUM DESTILATION PROCESS». HOUSTON TX. Patente US 2009/0031618 A1, 5 Febrero 2009.

[7] STANDARD EUROPEA, «EN 12662. Determinación de la contaminación total en destilados medios, combustibles diésel y ésteres metílicos de ácidos grasos.,» 2014.

[8] M. Laboratories, «Biodiesel Fuel Quality Standard,» SPECIFICATION FOR BIODIESEL (B100) – ASTM D6751-09, 2008.

[9] V. Van Hoed, N. Zyaykina, W. De Greyt, J. Maes, R. Verhé y D. Kristof, «Identification and Occurrence of Steryl Glucosides in Palm and Soy Biodiesel,» *J Am Oil Chem Soc*, vol. 85, pp. 701-709, 2008.

PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE BIOETANOL EN BOGOTÁ A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS SÓLIDOS

José Alejandro Rodríguez Redondo¹
Manuel Alejandro Mayorga Betancourt¹

¹ Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME
Universidad ECCI
alj.rodriguez.red@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

Una de las fuentes de energía renovable en la actualidad son las FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos), las cuales no poseen un uso específico que permita su aprovechamiento en la producción biocombustibles en Colombia, específicamente en Bogotá. Se elabora un estudio técnico para evaluar la ubicación de una planta de producción, obtención de materia prima, clasificación, transporte, procesos de producción del bioetanol, y finalmente un análisis económico básico para evaluar los costos de implementación del proyecto en la ciudad de Bogotá. Bogotá produce 2'264,040 t/año de FORSU aproximadamente, este volumen permite analizar tres escenarios de producción de combustible equivalente a 0.77% en fase inicial, 264% en fase intermedia y 388% en fase óptima de producción en relación proporcional con la demanda actual del combustible. Lo anterior, nos permite proyectar un máximo aprovechamiento de la FORSU producida y procesada para el abastecimiento de bioetanol de la ciudad.

Palabras claves: Biocombustible, bioetanol, fermentación, residuos.

INTRODUCCIÓN

El estudio tiene como principal objetivo determinar las ventajas, productividad y eficiencia de una planta de producción de bioetanol a base de FORSU, contribuyendo al mejoramiento de dos procesos ambientales relevantes para la ciudad, el primero, suministrar bioetanol para cumplir la mezcla E10 establecida por el gobierno nacional, el segundo, mejoramiento del sistema de reciclaje y disposición final de residuos, para este último se proyecta el uso del sistema de transporte actual, disminuyendo el impacto del proyecto. La fase teórica e investigativa de este proyecto es su máximo alcance para esta etapa, por lo cual no se incluyen pruebas físicas ni químicas sobre la materia prima presentada.

La actual tendencia global hacia la producción de biocombustibles de segunda y tercera generación, ha conducido a un salto trascendental en la implementación de biorrefinerías; de esta manera, se realiza una profundización en la producción del bioetanol enfocada a proyectos insignia a nivel mundial, véase Tabla 1, dichos proyectos son los más representativos en cuanto a tecnologías de punta y volúmenes de producción de bioetanol.

Las tecnologías usadas en estos proyectos aportan un punto de partida para esta investigación en cuanto a pretratamientos fisicoquímicos y cultivos de enzimas requeridas para el proceso de producción dadas las condiciones de operación y composición de la materia prima.

Tabla 1. Plantas de producción de etanol en el mundo a base de material orgánico.

Extraído de [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] [9], [10]

No.	Compañía	Ubicación	Capacidad	Volumen	Inicio	Materia Prima Residual
1	Bluefire Renewables	Izumi Japón	40 kg/h	21.150 gal/año	2002	Madera
		Fulton, Mississippi, EU	400 T.res/año	19 Mgal/año	2011	Lignocelulósica de cosechas
2	Imecal	L'Alcúdia, Valencia España	100 T.res/día 3600 T.res/año	16000 l/día 1.536 Mgal/año	2006	FORSU
3	Biogasol	Aakirkeby, Bornholm, Dinamarca	23.8 T.res/año	5.2 m-l/año 1.387 Mgal/año	2009	Lignocelulósica de cosechas
4	Ineos*	Florida, Estados Unidos	100.000 T.res/año	8 Mgal/año	2012	Lignocelulósica de cosechas, madera, FORSU.

* Existe un proyecto de Ineos en el Reino Unido pero aún no se ha confirmado su construcción.

No.	Compañía	Ubicación	Capacidad	Volumen	Inicio	Materia Prima Residual
5	Abengoa	Babilafuente, Salamanca, España W2B	25.000 T.res/año	1.5 Mg/año	2013	Sólidos urbanos
		Hugoton, Kansas, EU	350.000 T.res/año	25 Mgal/año	2013	Lignocelulósica de cosechas
		Biomass York, Nebraska, EU	--	0.02 Mgal/año	2007	Lignocelulósica de cosechas, follaje maíz
6	TMO Group	Dunsfold en Surrey, Reino Unido	--	--	2008	Sólidos municipales
7	Enerkem Alberta Biofuels	Edmonton, Alberta, Canadá	100.000 T.res/año	10 Mgal/año	2014	Sólidos municipales

* Existe un proyecto de Ineos en el Reino Unido pero aún no se ha confirmado su construcción.

MATERIALES Y MÉTODOS

La etapa investigativa, Figura 1, se concentra en páginas gubernamentales nacionales para obtener un panorama real sobre la materia prima y el mercado disponible para el nuevo producto, también, sobre los productores de biocombustibles y tecnologías de punta alrededor del mundo. Posteriormente se tabula la información evaluando las condiciones más adecuadas para la operación en la ciudad de Bogotá obteniendo un informe de viabilidad del proyecto en términos de eficiencia y productividad.

Figura 1. Metodología de investigación.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

De acuerdo con el observatorio ambiental de Bogotá, la demanda de biocombustible se encuentra planteada de la siguiente manera: Para el año 2013, existen 1’812.783 vehículos con motor a gasolina transitando por la ciudad [11], y 379.826 motocicletas [12], siendo estos los consumidores directos de 30’196.086 galones de etanol con un porcentaje de mezcla del 10% o E10 establecidos por el gobierno [13].

La materia prima, FORSU, en Bogotá está compuesta por restos de comida preparada, frutas, vegetales y papel, los cuales se planea procesar con base a las tecnologías descritas en la Tabla 1, considerando que las FORSU son una fuente relevante de polisacáridos de origen celulósico y hemicelulósico con un alto contenido de ligninas [14]. Se elabora un diagrama de proceso tomando como base hipotética principal el proyecto W2B (waste to biofuel, de Abengoa, véase Tabla 1, el cual para el año 2013 tuvo una proyección de producción de 1,5 millones de galones de bioetanol al año a partir de 25.000 t de FORSU. El proyecto W2B es la base teórica de este estudio considerando la caracterización de la materia prima y el proceso de producción, los cuales se ajustan a las condiciones actuales y requeridas para la ciudad de Bogotá.

Figura 2. Diagrama de proceso de fabricación de bioetanol a base de FORSU.

Con base a datos poblacionales de la ciudad de Bogotá para el año de 2011 [15], y los datos de consumo de alimentos que corresponden al año de 2012, se elab

bora una comparación entre la población bogotana y el consumo de alimentos que a su vez está relacionado con la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) para el año de 2011 [16], tal como se muestra en las Tablas 2 y 3.

La Tabla 2 muestra la totalidad de RSU producidos en la ciudad en el año 2011, estos están compuestos por los RSD que representan el 83.8% de los RSU, por lo tanto la composición de los RSD aun contiene material orgánico e inorgánico.

Tabla 2. Producción de residuos/habitante en Bogotá, año 2011 [16].

Descripción			Día		Mes		Año	
a	Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	100 %	6.289	t	188.670	t	2’264.040	t
b	Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD)	83,8 %	5.270	t	158.105	t	1’897.266	t
c	% de Residuos Orgánicos a partir de los RSD	68 %	3.584	t	107.512	t	1’290.141	t
d	Producción promedio de residuos orgánicos por habitante		0,480	Kg	14,397	Kg	172,76	Kg

Finalmente la parte orgánica de los RSD equivale al 68% según el estudio, pero debe considerarse que por la fuentes de producción estos residuos aun contienen material como cartón, papel, textiles e incluso restos de comida preparada. Los valores de la columna naranja en la Tabla 2 corresponden a los mostrados en la Tabla 3, estos valores indican el volumen de residuos producidos, los cuales son directamente proporcionales al crecimiento poblacional de la ciudad para los años 2012, 2013 y 2014

Tabla 3. Proyección en la producción de residuos en Bogotá.

Año		2011		2012		2013		2014	
Población		7’467.804	Hab.	7’571.345	Hab.	7’674.366	Hab.	7’776.845	Hab.
a	Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	2’264.040	t	2’295.431	t	2’326.664	t	2’357.733	t
b	Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD)	1’897.266	t	1’905.208	t	1’931.131	t	1’956.918	t
c	% de Residuos Orgánicos a partir de los RSD	1’290.141	t	1’295.541	t	1’313.169	t	1’330.705	t

La Figura 3, muestra el volumen de residuos generados en la ciudad provenientes de frutas y verduras, estos valores se obtuvieron de publicaciones específicas del ICBF, DANE, Secretaría Distrital de Planeación y la Alcaldía Mayor quien publicó un informe del Plan

Maestro de Abastecimiento y Seguridad Alimentaria para Bogotá (PMASAB). Esta información permite obtener el porcentaje de desperdicio de las frutas con mayor índice de consumo y un porcentaje aproximado de consumo por cada habitante, el cual equivale a 90,8g/día para las frutas y 79,9gr/día para verduras aproximadamente.

Posteriormente se analiza el porcentaje de desperdicio de las frutas y verduras en proporción con la población bogotana obteniendo las gráficas representadas en la Figura 3, donde se producen 3871,81 t de residuos, siendo 3206,27 t aportadas por frutas y 665.541 t aportadas por las verduras y hortalizas anualmente, esto equivale aproximadamente al 0.3% de los residuos orgánicos de la ciudad de Bogotá de acuerdo con la información de la Tabla 2 para el año 2014. Ver fila C de la Tabla 3.

Figura 3. Residuos de frutas y verduras producidos en Bogotá.

Extraído de [15], [16], [17], [18].

Se plantean tres escenarios de producción bioetanol con la información del año 2014: El primer escenario con 3871.81 t de residuos provenientes de frutas, verduras usadas a nivel doméstico y comercial. El segundo escenario con 1'330.705 t de residuos orgánicos de vegetales, frutas, papel, cartón y restos de comida preparada. El tercer escenario de producción con 1'956.918 t de residuos compuestos por material vegetal, papel, cartón, restos de comida preparada, textiles y algunos plásticos.

En cuanto al volumen de producción del proyecto, el dato base de producción para realizar una comparación con la cantidad de residuos en Bogotá es el suministrado por el proyecto Waste to Biofuel (W2B) de Abengoa en Salamanca España, con la capacidad de procesar y producir los siguientes volúmenes:

25.000 t de residuos → 1'500.000 galones de bioetanol en el año.

Retomando los tres escenarios de producción y la base de cálculo de producción del proyecto Abengoa, se obtienen los siguientes volúmenes de producción de bioetanol a partir de las FORSU en la ciudad de Bogotá.

Escenario 1, producción básica: 3871.81 t/año → 232.308 g/año. 0.77% de la demanda actual.

Escenario 2, producción intermedia: 1'330.705 t/año → 79'842.300 g/año. 264% de la demanda actual.

Escenario 3, producción alta: 1'956.918 t/año → 117'415.080 g/año. 388% de la demanda actual.

3.1 Información General del proyecto

Ubicación: Localidad de Tunjuelito, entre Av. Boyacá y relleno sanitario Doña Juana.

Materias primas principales: Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, FORSU.

Proceso de producción: Pretratamientos físicos de trituración, posterior pretratamiento con hidrólisis, fermentación del mosto, destilación, deshidratación y mezcla con la gasolina.

3.2. Detalles de la Inversión inicial del proyecto

Los valores registrados en la Tabla 4 provienen de la comparación y evaluación con tres proyectos de ingeniería construidos en Colombia mediante inversión extranjera siendo marcas reconocidas a nivel internacional (información confidencial). Los valores usados han sido evaluados respecto al tamaño de la planta, maquinaria y equipos a utilizar dentro de las instalaciones y basados en cotizaciones reales de fabricantes e importadores.

Tabla 4. Activos fijos tangibles.

	No.	Inversión en Activos Fijos	Unidades	Valor un.	Valor total
Tangibles	1	Adquisición del lote en la zona sur de Bogotá	1	\$15.000.000.000,00	\$15.000.000.000,00
	2	Construcción obra civil de la planta	1	\$150.000.000.000,00	\$150.000.000.000,00
	3	Maquinaria, equipos y herramientas	N.A.	\$280.000.000.000,00	\$280.000.000.000,00
	4	Vehículos de transporte	5	\$1.750.000.000,00	\$1.750.000.000,00
	5	Montacargas	5	\$1.500.000.000,00	\$1.500.000.000,00
	6	Equipos de computo	N.A.	\$200.000.000,00	\$200.000.000,00
	7	Mobiliario de oficina	N.A.	\$50.000.000,00	\$50.000.000,00
Total inversión inicial aproximada					\$448.500.000.000,00

CONCLUSIONES.

Se propone un aprovechamiento de la FORSU, RSD y RSU producidos en la ciudad de Bogotá para la producción de bioetanol y posterior mezcla con gasolina para abastecimiento único de la ciudad. Se espera lograr una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero del 6% con la mezcla vigente de E10, hasta tanto el gobierno colombiano permita el aumento en el porcentaje de mezcla. El desarrollo de tecnologías de punta e implementación de métodos de reciclaje más eficientes que pueden posicionar al país y la ciudad a nivel de Sur América como pioneros en el desarrollo de proyectos sostenibles y ambientalmente eficientes. La fase inicial del proyecto depende del desarrollo a nivel químico de las enzimas y levaduras para estabilizar adecuadamente el proceso de producción. Una eficiencia óptima del proyecto de acuerdo con la demanda del combustible en la ciudad equivalente a 30'196.086 g/año para el año de 2014.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Bluefire Renewables. (2009, Junio). Biorefinería Izumi, Japón. [Online]. Available: http://bfreinc.com/docs/IZUMI_Status_2004_for_BlueFire_051606.pdf

[2] Bluefire Renewables. (2013, Octubre). Biorefinería Fulton, Irvine CA. [Online]. Available: <http://bfreinc.com/2013/10/bluefire-renewables-adds-new-revenue-source-to-fulton-facility/>

[3] C. Coll, R. Castañeda. (2012, Marzo). IMECAL, Egética. Expoenergetica, Feria de las Energías. [Online] Available: http://www.imecal.com/pdfs/Presentacion_EGETICA_ES.pdf; <http://www.imecal.com/perseo/>

[4] BIOGASOL. (2009, Mazo). BORN BIOFUEL. [Online]. Available: http://demoplants.bioenergy2020.eu/img/files/related_publications/366/366_2009-03-09120901_related_publications.pdf

[5] INEOS. (2012, Agosto). THE WORD OF CHEMICALS. [Online]. Available: <http://www.ineos.com/businesses/ineos-bio/news/commissioning-under-way-at-florida-cellulosic-ethanol-plant/>

[6] ABENGOA BIOENERGY. (2013, Abril). Proyecto Babilafuente. [Online] Available: http://www.abengoa.com/web/es/noticias_y_publicaciones/noticias/historico/2013/04_abril/abg_20130318_2.html

[7] ABENGOA BIOENERGY. (2014, Octubre). Proyecto Hugoton, Kansas. [Online] Available: http://www.abengoa.com/export/sites/abengoa_corp/resources/gestion_noticias/pdf/20141017-Hugoton-inauguracion-es.pdf

[8] ABENGOA BIOENERGY. (2014, Octubre). Proyecto York, Nebraska, USA. [Online] Available: <http://pass-through.fwnotify.net/download/260971/http://www.crcao.org/workshops/LCA%20October%202009/Session%205/1-2%20Adams,%20Kevin.pdf>

[9] TMO GROUP. (2012, Agosto) [Online]. Available: <http://www.tmo-group.com/new-issue-eaa-prices-multi-tranche-deal/>

[10] ENERKEM. (2014, Junio). Waste Become Biofuels. [Online]. Available: <http://www.enerkem.com/en/facilities/plants/edmonton-alberta-canada.html>

[11] Observatorio Ambiental de Bogotá. (2013, Diciembre). Vehículos con Combustible Gasolina. [Online] Available: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=315&v=l#>

[12] Observatorio Ambiental de Bogotá. (2013, Diciembre). Motocicletas Particulares. [Online] Available: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=315&v=l#>

[13] Unidad de Planeación Minero Energética, Subdirección de demanda. (2014, Junio). Conversación en internet. [Online] Available e-mail: alj.rodriguez.red@gmail.com. Mensaje: Consumos mensuales de gasolinas en Bogotá.

[14] IMECAL. (2012, Marzo). Perseo, Bioetanol. [Online] Available: http://www.imecal.com/perseo/perseo_proyecto.html

[15] Secretaría Distrital de Planeación, «Diagnóstico de los aspectos físicos, demográficos y socioeconómicos año 2011,» Alcaldía Local De Usaquén, Bogotá D.C., Monografía 21, 2011.

[16] Alcaldía Mayor de Bogotá, «Consumo de alimentos y producción de residuos sólidos orgánicos en el uso residencial urbano de Bogotá D.C.,» Secretaría Distrital de Planeación, Bogotá D.C., Boletín No. 41, 2012.

[17] Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), Tabla de Composición de Alimentos Colombianos, Sexta edición ed. Bogotá D.C, Colombia: División de Comunicaciones ICBF, 1992.

[18] UAESP, «Programa para la gestión de residuos sólidos orgánicos para la ciudad de Bogotá, D.C.,» Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos, Bogotá D.C., Estadísticas Versión 2, 2010.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA TUSA DE MAÍZ BLANCO (*Zea mays* L.) CON POTENCIAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN

Martínez Caballero, Laura Viviana¹

¹ Universidad de La Sabana, Grupo GEMA (Energías, Materiales y Ambiente)
lauramaca@unisabana.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

Debido a la demanda energética y la necesidad del manejo integral de residuos, parte de los esfuerzos nacionales, se encaminan al desarrollo de sistemas de generación eléctrica a partir de biomasa como la gasificación. Los residuos de tusa de mazorca representan un residuo importante en términos de disponibilidad y potencial bio-energético en Colombia. Las características de la degradación térmica de tusa generada en CORABASTOS, fueron evaluadas mediante termogravimetría no isotérmica a tres tasas de calentamiento (5, 20 y 50°C/min) bajo atmósfera inerte. La investigación reportó tres etapas de degradación térmica (Pérdida de humedad, descomposición de celulosa y hemicelulosa, y descomposición de lignina). Adicionalmente, el análisis próximo y último de la biomasa mostró características favorables para el inicio de pruebas de gasificación en gasificador de lecho fijo – corriente descendente de 18kW de la Universidad de La Sabana para un futuro suministro energético a la institución. La biomasa presentó baja cantidad de cenizas, N₂ y S precursores de contaminantes y alto contenido de materia volátil y C que le confiere alto grado de reactividad o combustión menos prolongada.

Palabras claves: Análisis termogravimétrico (TGA), Gasificación de Biomasa, Producción energética, Tusas de mazorca.

INTRODUCCIÓN

Según el Plan Energético Nacional de Colombia, Ideario Energético 2015, la meta del país frente a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, para el 2020, es que al menos el 77% de la generación eléctrica nacional sea a partir de fuentes no convencionales de energía [1]. Sin embargo, las fuentes convencionales de energía como los combustibles fósiles y la energía hidráulica, continúan siendo la principal fuente de energía nacional con una cifra estimada del 79,8% de la generación y tan solo un 0,50% a partir de biomasa [2].

La co-utilización de residuos de biomasa en procesos de conversión termoquímica como la gasificación representan de las alternativas más importantes para el remplazo de los combustibles fósiles debido a la alta cantidad generada y menores costos con respecto a otras fuentes de energía renovable [3]. En Colombia las emisiones de GEI de larga duración como el metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) per cápita se han incrementado en un 21% [1] y 12,2% [2] en la última década respectivamente. Este incremento se debe principalmente a las actividades de combustión y agricultura donde se generan procesos como la descomposición anaerobia de los residuos agrícolas en cultivo [4].

Una gran cantidad de residuos de biomasa susceptibles de aprovechamiento energético son generados anualmente en Colombia provenientes del sector agrícola. Un ejemplo de esto son los residuos de tusa de maíz blanco generados en los cultivos y en las plazas de abastecimiento agropecuario. En Colombia, la Federación Nacional de cultivadores de Cereales (FENALCE), indicó que para el 2013, la producción total de maíz blanco fue de 709.267 toneladas cuyos residuos de tusa en la principal plataforma de abastecimiento agropecuario de Bogotá, CORABASTOS, representaron alrededor de 9500 toneladas de residuos [5].

El entendimiento de las reacciones generadas durante los procesos de conversión termoquímica de biomasa, así como las interacciones de transferencia de masa y energía son vitales para la obtención de parámetros de diseño y optimización de procesos de gasificación [6]. Se ha evidenciado que la formación de ciertos contaminantes durante el proceso de gasificación va asociados a ciertos parámetros de diseño y operación de un gasificador dados en parte por la materia prima seleccionada como alimentación. Es sabido que cada tipo de biomasa muestra un comportamiento de degradación térmica diferente durante el proceso de gasificación debido a la fuerte influencia

de su composición química y puede ser conocido mediante análisis termogravimétrico (TGA) [7][8].

El TGA ha sido de gran utilidad para la determinación de las propiedades de biomasa residual como el contenido de humedad y volátiles [9]. Los resultados obtenidos en función del tiempo o la temperatura indican un perfil termogravimétrico y han sido investigados por diferentes autores como, Aboyade et al. (2012) quién evaluó la devolatilización de mezclas de carbón, residuos de tusa de maíz y bagazo de caña de azúcar del sur de África usando termogravimetría bajo atmósfera de N₂. Así mismo, Aldana et al. (2015), quién valoró el efecto del tamaño de partícula y tres tasas de calentamiento sobre cáscaras de nuez localizadas al noreste de México.

Este estudio consistió en la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y comportamiento térmico de la tusa de maíz blanco producida en la plataforma de abastecimiento agropecuario de Bogotá CORABASTOS con el fin de conocer las propiedades fisicoquímicas y térmicas que le confieren características favorables para su aplicación en procesos de gasificación. Adicionalmente los resultados serán la fase previa al diseño de un sistema de suministro eléctrico a los laboratorios de ingeniería de la Universidad de La Sabana acoplado a un gasificador de lecho fijo- corriente descendente de 18kW.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras

El tipo de biomasa usado en este estudio correspondió a tusa de maíz blanco obtenido de la Plataforma de Abastecimiento Agropecuario de Bogotá, CORABASTOS. Las muestras fueron recibidas con un contenido de humedad entre 15-23% y fueron secadas en horno por tres horas a temperatura de 40°C, molidas en molino industrial y tamizadas hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 250µm (Tamiz ASTM 11/95 N° 60). El análisis último se llevó a cabo en un analizador Leco CHN -628 para la determinación de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno. Así como el análisis próximo desarrollado bajo el estándar ASTM D5142-09 mediante termogravimetría en equipo TGA/DSC 1 STARe System. Los resultados de la caracterización de las muestras utilizadas son presentados en la *Tabla 1*.

Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico se llevó a cabo mediante equipo METTLER TOLEDO TGA/DSC 1 STARe

System. Se utilizaron muestras en un rango de masa de 20-23mg y se llevaron a cabo los experimentos por duplicado a velocidades de calentamiento de 5, 20 y 50°C/min respectivamente. Las muestras se llevaron hasta temperatura de 900°C. El análisis se realizó bajo una atmosfera inerte de nitrógeno y se obtuvieron las curvas de variación de masa con respecto al tiempo y cambio de temperatura (TGA) y su primera derivada (DTG) para cada tasa de calentamiento respectivamente.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La tabla 1. Muestra los resultados del análisis próximo y último realizado a la biomasa.

Tabla 1. *Análisis último y Próximo de muestras de Tusa de Maíz blanco*

Análisis Próximo (% Masa)	
Humedad	7,46
Materia Volátil	81,48
Carbono Fijo b	14,81
Cenizas	4,17
Análisis último (% Masa LHC)a	
Hidrógeno	6,18
Nitrógeno	0,58
Azufre	0,20
Carbono	46,94
Oxígeno b	43,80

a BS: Base seca. **b** Calculado por diferencia

Análisis Próximo

Los resultados del análisis próximo de la tusa de maíz blanco presentaron similitud con resultados previamente reportados por otros autores para residuos similares. Un ejemplo de esto fue observado por Gai et al., [7] y Gao, Wang, Yang, & Chen, [10] quienes observaron grandes cantidades de materia volátil y carbono y bajas cantidades de cenizas, nitrógeno y azufre en residuos de cascarilla de arroz y cáscaras de durazno respectivamente.

De acuerdo al análisis próximo obtenido para la tusa de maíz blanco y los parámetros de gasificación de biomasa, se puede inferir que las muestras presentan características favorables para el proceso de gasificación debido a que: en primer lugar su contenido de humedad es bajo y apto para procesos termoquímicos cuyas condiciones deben ser inferiores al 40% para evitar la reducción de la eficiencia térmica en el proceso de gasificación y aumento de costos por la necesidad del completo secado de la biomasa [11][12].

En segundo lugar, el bajo contenido de cenizas (<5%) facilita la velocidad de combustión y evita problemas de aglomeración durante la combustión[13] Por último, la relación del contenido de materia volátil y carbono fijo (MV/CF) determinó el grado de reactividad de las muestras (5.50) ya que altos contenidos de materia volátil facilitan el encendido a bajas temperaturas lo que se traduce en una alta reactividad y una combustión menos prolongada [14]. Autores como [12], [13] encontraron valores de índices de reactividad para tusa de maíz similares a los encontrados en el presente estudio (5.37, 4.49 y 5.67 respectivamente) que en comparación con otros residuos como la cascarilla de arroz con índices inferiores al 4,5 [9], representan características más favorables para la combustión.

Análisis Último

Por otro lado, a partir del análisis último de las muestras de biomasa, es posible afirmar que el contenido de nitrógeno y azufre obtenido en las muestras (0.58% y 0.20% respectivamente), conduce a la formación de menor cantidad de óxidos de nitrógeno (NOx) y azufre (SOx) con respecto a biomasa residual como hojas de maíz (N: 0.97%), granos de cacao (N:2.64%, S: 0.29%) [9]. Así mismo, la relación oxígeno-carbono (O/C) vs hidrógeno-Carbono (H/C) conocida como relación Van Krevelen representada en la *Ilustración 1*. para la tusa de maíz blanco del presente estudio en comparación con los datos de los residuos previamente mencionados, mostró similitud en las propiedades de poder calorífico con residuos como la hoja de maíz (B) y los granos de cacao (C) debido a su mayor contenido de carbono con respecto al hidrogeno y O, lo que permite que se produzcan mayor número de enlaces C-C, los cuales contienen mayor energía que los enlaces C-O y C-H. Se observó una tendencia de valores experimentales de carbono cercano al 47% mientras que los combustibles fósiles tienen valores cercanos al 80% de carbono y 15% de oxígeno lo que les confiere mayor energía en el proceso de combustión [14].

Figura 1. *Diagrama Van Krevelen de tusa de maíz blanco del presente estudio(A) comparado con datos obtenidos por auto-*

res previamente para residuos de hoja de maíz (B), granos de cacao (C), corteza de limón (D), cáscara de pistacho (E) y semilla de durazno

Análisis termogravimétrico

Se determinó la pérdida de masa con respecto al tiempo de tusa de maíz blanco en atmosfera inerte de nitrógeno a una tasa de 150ml min⁻¹ utilizando tres velocidades de calentamiento (5°C min⁻¹, 20°C min⁻¹ y 50°C min⁻¹).

Figura 2. Curva DTG para descomposición térmica de tusa de maíz blanco a 5°C min⁻¹, 20°C min⁻¹ y 50°C min⁻¹

La figura 2 muestra las curvas DTG obtenidas, que representan la primera derivada de la conversión con respecto a la temperatura. En esta, se puede identificar tres fases de pérdida de masa. La primera de ellas ocurre aproximadamente a los 8 minutos de iniciar el proceso en un rango de temperatura de 25-105°C para las tres tasas de calentamiento respectivamente. Esta primera etapa está asociada a la pérdida de humedad de las muestras (aproximadamente el 65% en masa).

La segunda fase varió entre 105°C y 335°C. En la tasa de 20°C/min se observó un comportamiento múltiplo que puede ser explicado por la presencia de reacciones paralelas correspondientes a la degradación térmica de pseudocomponentes como la celulosa y hemicelulosa [15] teniendo en cuenta que según autores como [15], indican que 20°C min⁻¹ corresponde a la velocidad de calentamiento típica de degradación de dichos pseudocomponentes. Adicionalmente se puede inferir que la fase 3 corresponde al inicio de descomposición de volátiles más pesados y formación de carbonizado.

Una tercera y última fase se muestra en las curvas DTG, y corresponde a temperaturas de degradación entre 237°C y 723.3°C cuyo comportamiento corresponde a la degradación de lignina cuya degradación se encuentra entre rangos de 200°C - 605°C [15]. La mayor pérdida de masa se produjo durante la fase 3 por lo que se puede inferir la mayor contribución de descomposición de lignina (74-85 %) y por lo tanto mayor formación de carbonizado durante el proceso de

pirólisis previo a la gasificación. Por otro lado las tasas de calentamiento afectaron ligeramente la cantidad de pseudocomponentes liberados lo que se puede asociar a que cada componente tiene un rango determinado de descomposición a temperaturas independientes de la tasa de calor [4].

Una generación de picos menos definidos se observa al incrementar las tasas de calentamiento debido a que a tasas de calentamiento menores, la degradación térmica de los componentes se realiza de forma individual mientras que a altas velocidades la descomposición es simultánea. Dicha velocidad de descomposición de biomasa puede ser regida por diferentes factores durante el proceso de gasificación como el tamaño de partícula o la cantidad de materia volátil y carbono que contenga la biomasa confiriéndoles alta reactividad a la biomasa y poder calorífico más alto.

Las pruebas de caracterización fisicoquímica y termogravimétrica de biomasa, mostraron resultados favorables para el inicio de una fase posterior al estudio, para la gasificación de biomasa en gasificador de lecho fijo-corriente descendente de 18kw de La Universidad de La Sabana (Figura 3.) con el fin de alcanzar el suministro de energía eléctrica a la institución.

Figura 3. Equipo de gasificación de Lecho Fijo -Corriente Descendente de 18KW-Marca ALL POWER LABS de La Universidad de La Sabana

CONCLUSIONES

La tusa de maíz blanco localizada en la Plataforma de Abastecimiento Agropecuario de Bogotá, CORABASTOS presentó características teóricamente favorables para el proceso de gasificación en equipo gasificación de Lecho Fijo -Corriente Descendente de 18KW ubicado en la Universidad de La Sabana debido a su bajo contenido de humedad, cenizas y composición elemental óptima para el proceso.

A mayor tasa de calentamiento durante la termogravimetría, los picos de DTG son menos definidos debido a que los componentes de la biomasa no se degradan individualmente. La degradación puede estar asociada a tamaño de partícula de la biomasa y parámetros de composición fisicoquímica como la materia volátil y contenido de carbono. Entre las tasas de calentamiento utilizadas para la degradación de tusa de maíz, la tasa de 20°C/min indicó la mayor reactividad de las muestras presentando los picos más definidos. Los resultados obtenidos permitirán la predicción de los parámetros cinéticos de la combustión de la tusa de maíz lo que permitirá la predicción de tasas de consumo y eficiencia de productos en función de la composición estructural y propiedades térmicas y químicas lo que facilitará el diseño de procesos de gasificación y posible reducción de costos de proceso, problemas que constituyen el mayor impedimento para la aplicación de estas tecnologías como fuentes alternativas de producción de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Upme, "Informe Mensual De Variables De Generación Y Del Mercado Eléctrico Colombiano – Marzo De 2015", (69), 1–17.

[2] Upme, "Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2015", 184. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf

[3] H. Aldana, F.J. Lozano, F.J. Acevedo and A. Mendoza, "Thermogravimetric characterization and gasification of pecan nut shells", *Bioresour. Technol.*, 198, 634–641, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.069>

[4] J. Acevedo, J. Boracejo, and M. Velásquez, "Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia," p. 35, 2013.

[5] J. Ospina and F. Villamizar, "Consumo En Centrales De Abastos En Colombia," *Asoc. Iberoam. Technol. Postcosecha*, vol. 5, pp. 1–7, 2003.

[6] A. O. Aboyade, C. Marion, E. L. Meyer, J. H. Knoetze, and J. F. Gorgens, "Model fitting kinetic analysis and

characterisation of the devolatilization of coal blends with corn and sugarcane residues," *Thermochim. Acta*, vol. 530, pp. 95–106, 2012

[7] C. Gai, Y. Dong, and T. Zhang, "The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions," *Bioresour. Technol.*, vol. 127, pp. 298–305, 2013.

[8] W. B. Musinguzi, M. A. E. Okure, L. Wang, A. Sebit, and T. Løvås, "Thermal characterization of Uganda's *Acacia hockii*, *Combretum molle*, *Eucalyptus grandis* and *Terminalia glaucescens* for gasification," *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, pp. 402–408, 2012.

[9] A. A. Jain, A. Mehra, and V. V. Ranade, "Processing of TGA data: Analysis of isoconversional and model fitting methods," *Fuel*, vol. 165, no. October, pp. 490–498, 2016.

[10] Y. Gao, X. H. Wang, H. P. Yang, and H. P. Chen, "Characterization of products from hydrothermal treatments of cellulose," *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 457–465, 2012.

[11] A. O. Aboyade, J. F. Gorgens, M. Carrier, E. L. Meyer, and J. H. Knoetze, "Thermogravimetric study of the pyrolysis characteristics and kinetics of coal blends with corn and sugarcane residues," *Fuel Process. Technol.*, vol. 106, pp. 310–320, 2013.

[12] M. Asadullah, "Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 201–215, 2014.

[13] E. Biagini, F. Barontini, and L. Tognotti, "Gasification of agricultural residues in a demonstrative plant: Corn cobs," *Bioresour. Technol.*, vol. 173, pp. 110–116, 2015.

[14] R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín, and J. L. Bueno, "Characterization of Spanish biomass wastes for energy use," *Bioresour. Technol.*, vol. 103, no. 1, pp. 249–258, 2012

[15] D. López-González, M. Fernandez-Lopez, J. L. Valverde, and L. Sanchez-Silva, "Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass," *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 562–574, 2013.

OBTENCIÓN DE COMPOSITES FeNbMo SOPORTADOS EN AEROGEL DE CARBÓN PARA ELIMINACIÓN DE AZUFRE DE LOS COMBUSTIBLES

Alvarez, Anderson¹
Barbosa, Aida Liliana^{1*}
Del Toro, Raquel Sofia²
Morgado, Myloa²

¹Universidad de Cartagena, Laboratorio en Catalisis y Nuevos Materiales de la Universidad de Cartagena (LICATUC)

²Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas IVIC/ Centro de Química/ Carretera Panamericana km11, Altos de Pipe., Venezuela
abarbosal@unicartagena.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

Las reservas de petróleo en Colombia, Venezuela y México son alta en tenores de azufre, requiriendo el uso de nuevos materiales para obtener gasolina y combustible diésel de mejor calidad, acorde a legislaciones nacionales e internacionales. Se han empleado por décadas catalizadores Níquel o cobalto molibdeno sobre gamma Al₂O₃, sin embargo su eficacia para la remoción de azufre refractarios es baja. Para ello se proponen compuestos NbMoFe₃O₄, con diversos porcentajes de hierro y soportados, sobre aerogel de carbón, empleando atmósfera de N₂, para evitar la oxidación total de Fe²⁺ a Fe³⁺. Caracterización por BET dio superficies específicas mayores de 200 m²/g, favoreciendo la dispersión y estabilidad de las fases metálicas activas. Análisis DRX, mostró Fe₃O₄, Fe₂O₃, FeMoO₃, Fe₂(MoO₄) y Nb₂O₅ y enlaces Fe-O, Mo-O y Nb-O se observaron por Raman. El catalizador másico, mostró desactivación muy rápida y conversión de 50%, debida a la sinterización, la incorporación del carbón tuvo efecto estabilizante, removiendo tiofeno un 60%.

Palabras clave: Ferritas, hidrodesulfuración, soportes carbonosos.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de derivados del petróleo, la disminución a niveles críticos del crudo convencional y las normas ambientales cada vez más estrictas, frente a la producción de combustibles libres de azufre [1], requieren de un catalizador de hidrotratamiento más eficaz, estable y activo, en las reacciones de hidrodesulfuración (HDS). El Tiofeno es una molécula modelo, adecuada para el estudio de estas reacciones, debido a que su estructura es relativamente simple. Los catalizadores de HDS industriales convencionales consisten generalmente en MoS_2 , promovido con Co o Ni soportados sobre γ -alúmina ($\text{CoMoS}_2/\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ o $\text{NiMoS}_2/\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$) [2]. Este tipo de catalizadores aunque son muy activos para el crudo convencional, muestran una baja actividad hacia los compuestos de azufre altamente refractarios [3].

Una alternativa la constituyen materiales llamados ferritas, la cual es una combinación de los óxidos ferrosos y férricos [4], trabajos previos de *Gyanesh P. Khare*, desarrollaron un sistema sorbente consistente en ferrita de zinc, níquel y un aglutinante inorgánico, para la eliminación de azufre de gasolinas craqueadas y combustibles diésel, con cerca de 345 partes por millón de azufre y un 95% de compuestos tiofénicos, logrando una reducción significativa en el contenido de azufre [5]. *C. Babe et al*; emplearon ferrita de Zn en una composición de un 70% de ferrita de zinc y óxidos de hierro u óxidos de zinc, para la desulfuración profunda de hidrocarburos no oxidados, que comprenden compuestos orgánicos de azufre, por adsorción especialmente quimisorción de azufre, sobre ferrita de Zinc con un Diésel sintético que contenía 50 ppm en masa de 2,4 dimetildibenzotiofeno, logrando una reducción a un valor menor de 5ppm, en presencia de hidrógeno a 200° C y 450° C [6]. Recientemente se ha demostrado que sulfuro de niobio, puede ser una nueva fase activa interesante para la hidrodesulfuración, debido a sus propiedades ácidas únicas [7] [8]. Por lo que se propuso como parte de la formulación de ferritas de niobio-molibdeno ($\text{MoNbFe}_3\text{O}_4$) a partir de acetato ferroso, heptamolibdato de amonio y oxalato de niobio, empleando síntesis en atmósfera controlada con N_2 , los soportes tipo aerogeles de carbono, fueron sintetizados obteniendo el hidrogel de resorcinol-formaldehído, el cual fue polimerizado y pirolizado a 850° C, estos catalizadores se caracterizaron mediante BET, Raman y DRX para establecer su relación entre la estructura y la actividad y validar la síntesis realizada, la actividad catalítica HDS en la remoción de tiofeno, se efectuó en un reactor de lecho fijo y los productos fueron analizados por cromatografía de gases, con detector FID.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del soporte tipo aerogel de carbono.

Para la síntesis del aerogel se disolvió resorcinol en agua desionizada, en la razón molar seleccionada adicionándole carbonato de sodio. A la mezcla obtenida se agregó formaldehído ajustando el pH a 6 con NaOH o HCl y se puso en tubos de vidrio sellados, colocándolos en baño de agua desde 40°C a 85°C, entre 24 h a 96 de maduración. Luego fueron lavados, secados y calcinados en un horno de pirolisis a 850°C.

Obtención de Ferritas de Niobio-Molibdeno a partir de acetato de hierro (II), heptamolibdato de amonio y oxalato de niobio.

Para la síntesis se empleó cloruro ferroso FeCl_2 , seguido de la adición de 17mL de ácido acético concentrado, manteniendo 60°C durante 2 h, luego se enfrió la solución formándose un precipitado verde, correspondiente al acetato ferroso $[\text{Fe}(\text{CH}_3\text{COO})_2]$, que se filtró y se adicionó 25mL de la solución alcohólica de oxalato de niobio y 50mL de una solución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado, bajo atmósfera de N_2 , formándose inmediatamente una solución azul violeta bastante viscosa, se dejó envejecer durante 2 horas, se filtró y secó al vacío a 60°C, durante 12 horas.

Por último fueron calcinados a 400°C durante 4 horas. Obteniéndose el catalizador másicos tipo FeNb-Mo, que fue impregnado en los aerogeles de carbón, en porcentajes de 3%, 5% y 6% en hierro, los catalizadores los denotaremos como: soporte C16, obtenido a 10 °C y relación resorcinol/carbonato de sodio de 50. FeNbMo/C16(3%) cuando el porcentaje de hierro es 3%, FeNbMo/C16(5%) cuando el porcentaje de hierro es 5%, FeNbMo/C16(6%) cuando el porcentaje de hierro es 6%, soporte C17 obtenido a 10 °C y relación resorcinol/carbonato de sodio de 100. FeNbMo/C17(3%), FeNbMo/C17(5%) y FeNbMo/C17(6%).

Reacción de hidrodesulfuración de tiofeno

Los sólidos sintetizados fueron sometidos a un pretratamiento de sulfuración, con una mezcla de CS_2/H_2 a 100 ml/min y 400 °C por 2 h, para la obtención de la fase activa M-Mo-S, que son los sulfuros de los

componentes metálicos. Los ensayos de actividad catalítica en HDS de tiofeno fueron hechos con 150 mg del catalizador, un flujo de alimento de 100 ml/min, a 400 °C por 2h de reacción, empleando un reactor de lecho fijo. Los productos fueron analizados mediante un cromatógrafo de gases (Varían, modelo 3700) con una columna empacada (Porapak) que operó a 170 °C con N2 como gas de arrastre, tomando e inyectando 2mL de muestra de corriente gaseosa de productos a intervalos de 12 minutos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis Raman de los catalizadores másicos y del acetato ferroso

A continuación se presentaran los espectros Raman del acetato ferroso y de los catalizadores másicos FeMo(II) y FeNbMo, cuyos análisis fueron realizados con un espectrómetro Raman Bayspec 1064. En la figura 1 correspondiente al acetato ferroso se muestra una banda en 627cm-1 adjudicada a la vibración del grupo COO, una de mayor intensidad cerca de 892cm-1 se atribuyó al estiramiento C-C del grupo acetato [9], la señal ubicada en 537 cm-1, puede ser atribuida a impurezas de Cl2, proveniente de HCl empleado en la síntesis, la banda a 1045 cm-1 puede deberse a estiramiento de tipo Fe2+-O [10].

Figura 1: Espectro raman del acetato ferroso[Fe(CH3COO)2]

La figura 2 muestra el espectro raman del catalizador FeNbMo con señales en 949cm-1 y 875cm-1 atribuidas a estiramientos de tipo Mo-O [11] y bandas alrededor de 935cm-1, 475cm-1 y 398cm-1 atribuidas a estiramiento de tipo Nb-O posiblemente del NbO2 [12]. Observamos dos bandas situadas en 685cm-1 y 533cm-1, que fueron asignadas a fases de magnetita

(F3O4), las señales muy intensas en 1046cm-1, 1143 cm-1 y 1289 cm-1 características de hematita (Fe2O3), debidas a la oxidación de F3O4, ocurrida durante la calcinación del catalizador o los prolongados tiempos de la radiación del láser, durante el análisis raman [13]. las bandas en 1467cm-1, 1638 cm-1, 1764 cm-1 fueron atribuidas a óxidos y cloruros de hierro [14]. Los análisis morfológicos y texturales de los aerogeles C16 y C17 se muestran en la Tabla 1, de naturaleza mesoporosa, con un rango de 200 nm a 5000 nm.

Figura 2: Espectro Raman de FeNbMo

Análisis de difracción de rayos X (DRX).

Con el fin de determinar las fases cristalinas presentes, se realizó difracción de rayos X, empleando un difractómetro SIEMENS D-5005 dentro del rango de $10^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$. En la mayoría de los difractogramas vamos a observar una banda bastante ancha a $2\theta = 15-20$ que corresponde al (Si) del porta muestra debido a la poca cantidad de muestra utilizada para los análisis.

La figura 3 mostró los difractogramas de FeNbMo másicos, el primero secado a 100°C (figura 3a) y el segundo calcinado a 400°C (figura 3b). Se apreció que el catalizador calcinado a 400°C (figura 3b) mostró mayor cristalinidad con picos definidos y de intensidad alta. Mientras que el catalizador seco a 100°C es muy amorfo, debido a la presencia de agua adsorbida, notándose una señal bastante intensa a $2\theta=18,26^\circ$ correspondiente a magnetita (Fe3O4) (■). Las señales características de la magnetita (Fe3O4) (■) se ubicaron en $2\theta = 18,26^\circ, 30,06^\circ, 35,64^\circ$ y $37,60^\circ$ [15], banda situadas en $2\theta = 40,10^\circ, 33,98^\circ$ y $53,51^\circ$, pueden ser atribuidas a fases de hematita (Fe2O3) (o), debido a la oxidación de la magnetita (Fe3O4) [16]. Ade-

más se muestran señales que puede atribuirse a óxidos de molibdeno, como es el caso de FeMoO_3 ($\blacklozenge$) que muestra señales en $2\theta = 25,57^\circ, 27,32^\circ, 58,78^\circ$, el $\text{Fe}_2(\text{Mo}_4)_3$ ($\triangle$) muestra bandas a $2\theta = 20,36^\circ, 22,95^\circ, 24,89^\circ, 44,95^\circ$ [17]. Por último se aprecian señales debido a óxidos de niobio (NbO_2) ($\bullet$) las cuales se sitúan en $2\theta = 28,31^\circ$ y $31,20^\circ$. Los resultados mostrados en DRX están de acuerdo con los resultados presentados en espectroscopia Raman, ratificando que las distintas interacciones entre los enlaces mostradas en el espectro raman (figura 2) son causados por estados vibracionales excitados de las fases cristalinas que se presenta en el difractograma (figura 3).

Figura 3: patrones DRX de las muestras (a) FeNbMo másico a 100°C y (b) FeNbMo másico a 400°C .

Las figuras 4 y 5 ilustran los patrones DRX de las muestras carbón activo C16 (figuras 4a), $\text{FeNbMo}/\text{C16}$ (3%) (Figura 4b), $\text{FeNbMo}/\text{C16}$ (5%) (Figura 4c), $\text{FeNbMo}/\text{C16}$ (6%) (Figura 4d), carbón activo C17 (figura 5a), $\text{FeNbMo}/\text{C17}$ (3%) (Figura 5b), $\text{FeNbMo}/\text{C17}$ (5%) (Figura 5c), $\text{FeNbMo}/\text{C17}$ (6%) (Figura 5d). La figura 4 muestra picos anchos correspondientes a muestras amorfas, los cuales coinciden con la estructura de un carbón activo [18]. Señales anchas alrededor de $2\theta = 20^\circ\text{--}25^\circ$ correspondientes a la reflexión del plano (002), del carbón debido al apilamiento de capas de compuestos aromáticos presentes en su estructura [19]. En la figura 5, se notan diferencias de amplitud en el pico $2\theta = 20^\circ\text{--}25^\circ$, para las diferentes muestras. Se observa que a medidas que la cantidad catalizador impregnado sobre el soporte es mayor, la intensidad de los picos disminuye y el ancho de banda es mayor, lo cual se debe a un ligero aumento del grado de desorden de la estructura del carbón posiblemente por la incorporación de los metales a la misma. Además para los catalizadores soportados con alto contenido de FeNbMo (5 y 6%) se apreciaron señales correspondientes a Fe_3O_4 ($\blacksquare$), FeMoO_3 ($\blacklozenge$), $\text{Fe}_2(\text{Mo}_4)_3$ ($\triangle$) y NbO_2 ($\bullet$).

Figura 4: Patrones DRX de las muestras: (a) carbón activo soporte C16, (b) $\text{FeNbMo}/\text{C16}$ (3%), (c) $\text{FeNbMo}/\text{C16}$ (5%) y (d) $\text{FeNbMo}/\text{C16}$ (6%).

Figura 5: Patrones DRX de las muestras: (a) carbón activo soporte C17, (b) $\text{FeNbMo}/\text{C17}$ (3%), (c) $\text{FeNbMo}/\text{C17}$ (5%) y (d) $\text{FeNbMo}/\text{C17}$ (6%).

Caracterización física de los soportes carbonosos

En la tabla 1, se evidenció que el aerogel C16 presenta mayor área superficial con un valor de $516,635 \text{ m}^2/\text{g}$, debido a una baja temperatura de maduración del hidrogel, lo que permite procesos de cristalización y acomodación de las cadenas orgánicas, más lentos y uniformes, cuando la temperatura fue mayor C17 favoreció un mayor movimiento y choque molecular, inhibiendo la capacidad de unirse y permanecer en la misma posición por tiempos largo, lo que redujo su área y aumento el tamaño del poro.

Tabla 1: Caracterización física de los aerogeles de carbón utilizados como soporte para catalizador FeNbMo empleados en el proceso de HDS de tiofeno.

Aerogel de carbón	Volumen del poro (cm^3/g)	Diámetro promedio de poro ($\text{\AA}$)	Área específica BET (m^2/g)
C_{16}	0,4235	288,06	516,635
C_{17}	0,2408	302,18	271,498

Análisis de la conversión de tiofeno con catalizadores de FeNbMo másico y soportados

Respecto a los ensayos catalíticos, figura 6, se aprecia una desactivación muy rápida, del catalizador másico, el cual alcanzó estado estacionario a los 72 minutos de reacción, pese a que posee una gran cantidad de fase activa, esto puede deberse a diferentes factores uno de ellos la sinterización y envejecimiento de las partículas de la fase metálica FeNbMo (másico), que al no estar dispersa se conglo mer a y otra razón podría relacionarse, con una superficie de específica baja [19].

Figura 6: Conversión de tiofeno con (a) FeNbMo másico; (b) FeNbMo/C₁₆(3%); (c) FeNbMo/C₁₆(5%); (d) FeNbMo/C₁₆(6%); (e) FeNbMo/C₁₇(3%); (f) FeNbMo/C₁₇(5%); (g) FeNbMo/C₁₇(6%).

Otro de los factores desactivantes, se debe al cambio de estado de oxidación paulatino en el hierro perdiéndose la riqueza en Fe²⁺ lo que se relaciona con la fase activa, finalmente con la formación de fases sulfuradas que se van quedando taponando los centros activos, o a la formación preferencial de óxidos segregados sobre la superficie, perdiendo rápidamente su actividad con respecto a los catalizadores soportados. Lo que ratifica el gran aporte y el efecto benéfico del soporte carbonoso poroso, sobre la fase metálica que la dota de una mayor estabilidad, asociada al grado de dispersión y la distribución de las fases activas, sobre la superficie del carbón, además el carbón ejerce un efecto reductor sobre el hierro y aporta una ligera acidez lo que da hidronios en la superficie, favoreciendo la permanencia del hierro (Fe²⁺) más tiempo reducido y disperso, dificultándose su transformación a las fases de Fe³⁺, que se registran por otros autores como menos activas, evitando la aglomeración de las fases metálicas (sinterización) y produciendo una cinética de desactivación más lenta. [19]. Otra posible causa

de la actividad catalítica está relacionada con el aporte de los óxidos de niobio ya que dota al catalizador con propiedades ácidas únicas mejorando así los sitios activos y contribuyendo a un mejoramiento en la actividad catalítica en HDS como lo han reportado *M. Nagai et al* [20] y *J. Datka et al* [21]. De todos los sistemas catalíticos empleados en el proceso de hidrodesulfuración el catalizador que mostro mayor actividad y mayor estabilidad frente a los demás fue FeNbMo/C₁₆ (6%) y esto es debido al alto valor de área superficial que presenta el soporte empleado para este sistema, brindándole con esto mayor estabilidad y mayor dispersión de las fases metálicas impidiendo con esto que su sinterización se más rápida.

CONCLUSIONES

La síntesis de aerogeles de carbón mediante descomposición de resorcinol-formaldehído y la pirolisis en atmósfera de nitrógeno resultó efectiva para dispersar las fases metálicas tipo FeNbMo, registrándose un comportamiento activo y estable para la remoción de azufre de la molécula de tiofeno. Por otra parte la obtención de catalizadores tipo ferritas de niobio-molibdeno implementando la línea Schlenk fue exitosa, lográndose en microreacción una conversión de tiofeno en el estado estacionario, entre 50 y 60% en un tiempo de 144 minutos de reacción, mostrando que el carbón actúa como estabilizante de la fase metálica FeNbMo evitando su sinterización en menor tiempo, el aporte de las propiedades ácidas de los óxidos de niobio fue de gran importancia para aumentar la actividad en HDS.

AGRADECIMIENTOS

Anderson Álvarez agradece a Unicartagena-Ivic-Colciencias por la pasantía para experimentos del proyecto. No. 110756933287 y proyecto de sostenibilidad vicerrectoría investigaciones Unicartagena 2015-2016. Al Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología Colciencias-UniCartagena por el proyecto No. 110756933287.2013-2016.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] M. M. Hossain, M. A. Al-Saleh, M. A. Shalabi, T. Kimura, and T. Inui, "Thiophene hydrodesulfurization over noble metal modified Co-clay catalysts," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 274, no. 1–2, pp. 43–48, Oct. 2004.

- [2] B. Liu, Z. Zhao, D. Wang, J. Liu, Y. Chen, T. Li, A. Duan, and G. Jiang, "A theoretical study on the mechanism for thiophene hydrodesulfurization over zeolite L-supported sulfided CoMo catalysts: Insight into the hydrodesulfurization over zeolite-based catalysts," *Comput. Theor. Chem.*, vol. 1052, pp. 47–57, 2015.
- [3] E. Furimsky, "Metal carbides and nitrides as potential catalysts for hydroprocessing," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 240, no. 1–2, pp. 1–28, 2003.
- [4] F. prieto García, E. R. Ramírez, M. A. M. Marzo, and A. G. Martínez, "Caracterización de ferritas obtenidas mediante mecanosíntesis," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 28, pp. 1–12, 2008.
- [5] Gyanesh P. Khare, "Sorbent composition for removal of sulfur from cracked gasolines and diesel fuels consisting of zinc ferrite, nickel and inorganic binder, wherein zinc ferrite and nickel are present in reduced valence state," US6346190 B1, 2002.
- [6] C. Babe, A. Baudot, D. Bazer-Bachi, C. Bobin, C. Geantet, T. Huard, and A. Tanguy, "Use of zinc ferrite-based solids in a process for deep desulfurization of hydrocarbon fractions," US20100089799 A1, 2010.
- [7] V. Gaborit, N. Allali, C. Geantet, M. Breysse, M. Vrinat, and M. Danot, "Niobium sulfide as a dopant for hydrotreating NiMo catalysts," *Catal. Today*, vol. 57, no. 3–4, pp. 267–273, 2000.
- [8] M. Danot, J. Afonso, J.L. Portefaix, M. Breysse, T. des Courières, *Catal. Today* 10 (1991) 629
- [9] R. . Frost and J. . Klopogge, "Raman spectroscopy of the acetates of sodium, potassium and magnesium at liquid nitrogen temperature," *J. Mol. Struct.*, vol. 526, no. 1–3, pp. 131–141, 2000.
- [10] J. Dünnwald and a. Otto, "An investigation of phase transitions in rust layers using raman spectroscopy," *Corros. Sci.*, vol. 29, no. 9, pp. 1167–1176, 1989.
- [11] N. Boucherit, a. Hugot-Le Goff, and S. Joiret, "Raman studies of corrosion films grown on Fe and Fe-6Mo in pitting conditions," *Corros. Sci.*, vol. 32, no. 5–6, pp. 497–507, 1991.
- [12] B. X. Huang, K. Wang, J. S. Church, and Y.-S. Li, "Characterization of oxides on niobium by raman and infrared spectroscopy," *Electrochim. Acta*, vol. 44, no. 15, pp. 2571–2577, 1999.
- [13] D. Bersani, P. P. Lottici, and a Montenero, "Micro-Raman investigation of iron oxide films and powders produced by sol–gel syntheses," *J. Raman Spectrosc.*, vol. 30, no. 5, pp. 355–360, 1999.
- [14] F. G. Camacho and W. A. Alves, "Using IR and Raman spectra to explain the catalytic activity of the Fe(II)/Fe(III) pair toward the cleavage of peptide bonds," *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 151, pp. 11–5, 2015.
- [15] O. Ivashchenko, M. Lewandowski, B. Peplińska, M. Jarek, G. Nowaczyk, M. Wiesner, K. Załęski, T. Babutina, A. Warowicka, and S. Jurga, "Synthesis and characterization of magnetite/silver/antibiotic nanocomposites for targeted antimicrobial therapy," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 55, pp. 343–359, 2015.
- [16] M. Fondell, F. Johansson, M. Gorgoi, L. von Fieandt, M. Boman, and A. Lindblad, "Phase control of iron oxides grown in nano-scale structures on FTO and Si(100): Hematite, maghemite and magnetite," *Vacuum*, vol. 117, pp. 85–90, 2015.
- [17] Z. Qin, T. Su, Y. Jiang, H. Ji, and W. Qin, "Preparation of W-modified FeMo catalyst and its applications in the selective oxidization of p-xylene to terephthalaldehyde," *Chem. Eng. J.*, vol. 242, pp. 414–421, 2014.
- [18] N. Yoshizawa, K. Maruyama, Y. Yamada, and M. Zielinska-Blajet, "XRD evaluation of CO₂ activation process of coal- and coconut shell-based carbons," *Fuel*, vol. 79, no. 12, pp. 1461–1466, 2000.
- [19] A. L. Barbosa, R. Del Toro, E. Rio, J. Caraballo, and A. F. Vega, "Mejoramiento de la estabilidad de catalizadores Fe-Mo en la reacción de HDS , mediante la obtención de aerogeles de carbón," *Sci. J. from Exp. Fac. Sci. universida zulia*, vol. 22, pp. 137–146, 2014.
- [20] M. Nagai, R. Nakauchi, Y. Ono, and S. Omi, "CVD preparation of alumina-supported niobium nitride and its activity for thiophene hydrodesulfurization," *Catal. Today*, vol. 57, no. 3–4, pp. 297–304, 2000.
- [21] J. Datka, A. M. Turek, J. M. Jehng, and I. E. Wachs, "Acidic properties of supported niobium oxide catalysts: An infrared spectroscopy investigation," *J. Catal.*, vol. 135, no. 1, pp. 186–199, 1992.

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ESTIÉRCOL BOVINO

Rodríguez Vargas, Ángel David¹
Morales García, Laura Andrea¹
Rojas Cubides, Herbert Enrique¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Compatibilidad Electromagnética (GCEM)
androdriguezv@correo.udistrital.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

El interés mundial en la producción de biogás ha mostrado un gran crecimiento en los últimos años debido a que su uso trae beneficios sociales, económicos y ambientales, asociados con el tratamiento de residuos y su capacidad de reemplazar parcialmente los combustibles fósiles. En Colombia, tradicionalmente el sector agropecuario ha sido uno de los principales sectores productivos, y dentro de este, se destaca la industria bovina la cual genera una gran cantidad de residuos que se pueden aprovechar para generar electricidad y otros tipos de energía. Sin embargo, la explotación del biogás en el país se ha desarrollado lentamente y sólo algunas industrias han incursionado en este tema. Este artículo describe el proceso para estimar el potencial energético del biogás producido por la digestión anaerobia (DA) de residuos provenientes de la industria bovina. La estimación energética del biogás se realizó tomando como escenario el departamento de Antioquia al ser una de las regiones con mayor número de cabezas de ganado en el país. La tecnología de conversión biogás-electricidad usada es una microturbina de gas acoplada a un generador sincrónico que cuenta con una etapa de electrónica de potencia (rectificador/inversor). La generación del biogás fue estimada usando el modelo de digestión anaerobia No-1 (ADM1), mientras que la microturbina fue representada con el modelo de Rowen. Finalmente, el generador sincrónico y la unidad rectificador/inversor fueron simulados usando los bloques disponibles en Matlab/Simulink. El estudio permitió determinar que a partir del biogás producido por 257 cabezas de ganado durante 100 días es posible generar aproximadamente 3066 kWh de electricidad.

Palabras claves: ADM1, biogás, energía renovable, potencial energético.

INTRODUCCIÓN

El biogás es un biocombustible compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), capaz de sustituir parcialmente a los combustibles fósiles [1]. Este es producido por la digestión anaerobia (DA) controlada de materia orgánica en biodigestores, la cual puede proceder de residuos agrícolas [2], [3] respectively. The biogas is a source of biomethane to replace natural gas in the gas grid system. Biogas can be utilised to generate combined heat and power (CHP, plantas de tratamiento de aguas residuales [4] o cultivos energéticos [5], entre otros.

Además, es considerado una fuente potencial de energía renovable, ya que mediante diferentes sistemas de conversión puede ser convertido a energía térmica o eléctrica [1]. Este proceso de conversión puede ser usado por diferentes industrias y hace posible su autoabastecimiento energético y la venta de excedentes de energía eléctrica a la red, aumentando sus ingresos económicos [6], [7]. Este plan de negocios puede ser aplicado a la industria agropecuaria, la cual es una de las principales actividades económicas en diferentes zonas de Colombia y cuyo sub-sector más representativo es el bovino. Este sector cuenta con más de 22 millones de animales que producen alrededor de 450 toneladas de estiércol por día [8]. Esta producción es liderada por el departamento de Antioquia con casi 2,7 millones de cabezas de ganado [9].

Para usar el biogás como fuente de energía renovable es necesario estimar su potencial energético. Entre las herramientas más empleadas para determinar la producción de biogás están los modelos matemáticos que representan de manera general el comportamiento de la DA. Sin embargo, la DA es un proceso complejo y no lineal, que depende de subprocesos secuenciales y simultáneos que se ven afectados por variables como la temperatura y el pH, lo que hace difícil estimar su comportamiento [10]. Aun así, a lo largo de los años se han desarrollado diferentes modelos que representan los principales aspectos biológicos de la DA, mejorando la comprensión del sistema y la predicción del proceso bajo distintas condiciones [11].

Este es el caso del modelo de digestión anaerobia No 1 (ADM1), el cual está basado en los procesos bioquímicos y fisicoquímicos que se suscitan entre diferentes tipos de microorganismos que de manera secuencial y paralela degradan los compuestos complejos en compuestos sencillos [12]. El ADM1 es el modelo más referenciado en la literatura debido a que puede ser utilizado en cualquier tipo de biodiges-

tor o con cualquier materia orgánica. Gracias a esto, el ADM1 ha demostrado ser un modelo funcional que puede ser aplicado de manera general con ligeras variaciones en algunos de sus parámetros [11]. Algunos estudios recomiendan cambiar los valores de los parámetros estequiométricos, bioquímicos y fisicoquímicos del modelo, dependiendo del tipo de residuo que se vaya a utilizar [13]. De igual forma, se debe realizar una buena caracterización de los residuos de entrada y del sustrato en estado estacionario dentro del reactor para obtener resultados confiables sobre la producción de biogás [14].

Una vez obtenido el biogás, es posible estimar el potencial energético a partir de su contenido de metano y su poder calorífico. La conversión de biogás a electricidad es una de las formas preferidas para aprovechar la energía química de este biocombustible y se puede lograr utilizando tecnologías como el motor de combustión interna (MCI), la celda de combustible (CC) y la turbina de gas (TG) [1]. En la mayoría de los casos, se usa un MCI acoplado a un generador eléctrico [15]. Aunque los MCI pueden lograr eficiencias de hasta 40% cuando tienen sistemas de recuperación, estos presentan mayores emisiones de gases de efecto invernadero y costos de mantenimiento. Además, estos equipos son más susceptibles a los contaminantes presentes en el biogás como las trazas de ácido sulfhídrico y siloxanos [1]. Por su parte, las CC son las que poseen mejor eficiencia de conversión (hasta 70%), pero aún se encuentran limitadas a aplicaciones experimentales debido a su elevado costo de inversión y su corta vida útil [16]. En contraste, las turbinas y microturbinas son las que presentan menores costos de inversión y relación costo/kWh. Adicionalmente, presentan gran flexibilidad para usar diferentes tipos de combustible, desde gases de bajo poder calorífico como el biogás hasta combustibles líquidos [1]. Esta capacidad de adaptarse a diferentes cantidades de biogás sin afectar significativamente su rendimiento y sin requerir grandes modificaciones, hace a la TG una excelente opción para combustibles no homogéneos como el biogás [17].

Aunque la perspectiva de su aplicación y las tecnologías para la producción y aprovechamiento del biogás son ampliamente conocidas en países industrializados como Alemania, Estados Unidos, Italia o China, la utilización de este biocombustible como insumo para la generación de electricidad ha sido poco investigada y documentada en Colombia, aún en comparación con algunos países latinoamericanos como Brasil y Costa Rica [18], [19]. Esto se debe en parte a la falta de experiencia, a los costos de implementación de los sistemas de generación de electricidad a partir de bio-

gás (SGEB) y al desconocimiento del proceso de DA y del potencial del recurso [20].

Teniendo en cuenta lo anterior, esté artículo presenta las ventajas que tiene la generación de biogás a partir de estiércol bovino como materia orgánica y describe el proceso para estimar el potencial de generación de electricidad a partir del biogás producido. Este trabajo se desarrolla en dos etapas: primero, se estima la producción de biogás usando el ADM1 y posteriormente, se determina la electricidad generada por una microturbina alimentada con el biogás. En el esquema de conversión biogás-electricidad, se usa una microturbina representada con el modelo de Rowen [21], [22]. A su vez, la turbina es acoplada a un generador sincrónico empleando Matlab/Simulink®. Debido a las altas frecuencias de rotación de la microturbina fue necesario incluir una etapa de electrónica de potencia (rectificador/inversor) cuya función es disminuir la frecuencia de la tensión y corriente generada a 60 Hz, y así, facilitar la conexión de una instalación eléctrica representada por una carga de 25 kW.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del biogás usando el ADM1

Teniendo como escenario de estudio el departamento de Antioquia, el cual es una de las regiones de Colombia con mayor cantidad de ganado bovino, se determinó en primera instancia el número promedio de animales por finca en cada municipio del departamento. Este dato se estimó usando los resultados del Censo Pecuario Nacional del año 2016 presentado por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) [9]. Con esta información, se logró determinar que el municipio de Puerto Berrio es el que posee mayor número de animales promedio por finca con 257 cabezas.

Para determinar la carga de entrada al biodigestor y el dimensionamiento del mismo se utilizó la metodología presentada por la Unidad de Planeación energética (UPME) en [23], la cual se basa en variables fácilmente cuantificables como el peso vivo de los animales y su producción de estiércol y orina en porcentaje de peso vivo del animal, los cuales en el caso de estudio propuesto fueron 400 kg, 5% y 4% respectivamente, con lo que se obtuvo una carga diaria de 9,25 m₃/día. Para este flujo de entrada es necesario que el biodigestor cuente con un volumen aproximado de 591 m³, de los cuales 473 m₃ serán para alojar el sustrato y los 118

m₃ restantes son para almacenar el biogás de forma directa [23].

La cantidad de biogás generado y sus características fueron obtenidas haciendo uso de un aplicativo computacional del modelo ADM1 desarrollado por los autores en Matlab/Simulink® y basado en el trabajo descrito por Rosen y Jeppsson en [24]. Las variables de funcionamiento del ADM1 están divididas en tres grupos: características del residuo de entrada, características del sustrato (materia orgánica dentro del biodigestor) y un conjunto de parámetros estequiométricos, bioquímicos, fisicoquímicos y físicos. Las características del residuo de entrada están agrupadas en 26 variables que deben ser ingresadas al modelo, incluyendo el flujo de entrada en m₃/día y la temperatura operacional del sistema (generalmente 35°C). Es importante mencionar que estas variables de entrada deben ser definidas a partir de pruebas en laboratorios especializados o siguiendo metodologías estandarizadas. Para este trabajo, los datos base de los parámetros estequiométricos, bioquímicos, fisicoquímicos y físicos fueron tomados de [24].

Debido al gran número de variables de entrada del ADM1, han surgido diversos métodos de simplificación entre los cuales se encuentra el modelo de transformación [25]. Con este modelo simplificado se logra obtener las 26 variables de entrada al ADM1 a partir de la conversión de 11 variables características del residuo. Estos parámetros de entrada fueron tomados de [25] y son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de entrada al modelo de transformación para estiércol bovino. Adaptado de [25]

Variables Características del residuo	Valor	Unidad
DQO particulada (DQOp)	23550	gDQOm ⁻³
DQO soluble sin DQO de ácidos grasos volátiles (DQOs-AGV)	2521	gDQOm ⁻³
Ácidos grasos Volátiles (AGV)	1146	gDQOm ⁻³
Carbono orgánico total (COT)	9339,6	gCm ⁻³
Nitrógeno orgánico total (Norg)	598	gNm ⁻³
Nitrógeno Amoniacal total (NAT)	284	gNm ⁻³
Fósforo orgánico (TP-orthoP)	187	gPm ⁻³
Orto fosfato (orthoP)	32	gPm ⁻³
Carbono Inorgánico total (CIT)	60,4	Mol HCO ₃ ⁻ m ⁻³
Alcalinidad total (S cationes)	60	Equ m ⁻³
Sólidos fijos	5397,00	gm ⁻³

Sistema de conversión biogás-electricidad

La microturbina seleccionada fue la Capstone C30, ya que esta posee una eficiencia del 28% y además so-

porta pequeñas cantidades de H₂S en el combustible de entrada. La turbina esta acoplada a un generador sincrónico que produce electricidad a 1600 Hz debido a su velocidad de rotación [26]. Por esta razón es necesario adicionar una etapa de electrónica de potencia donde se rectifique la tensión y luego sea convertida a corriente alterna de 60 Hz mediante un inversor modulado con PWM. El esquema del módulo turbina-generador-inversor fue implementado en Matlab® y se muestra en la Figura 1.

Tabla 2. *Parámetros operacionales a condiciones estándar de la microturbina C30. Extraído de [27]*

Parámetro	Unidades	Valor
Potencia nominal	kW	30
Velocidad nominal	Rpm	96000
Relación de presión	-	4
Eficiencia eléctrica	%	26
Voltaje de salida (AC)	V	400-480
Frecuencia	Hz	50/60
Gases de escape	Kg/s	0,31
Temperatura de los gases de escape	°C	275
Consumo específico de combustible	MJ/kWh	13,8

Figura 1. Sistema de conversión biogás-electricidad completo

El modelo de la TG se desarrolló tomando como base las referencias [22], [28], donde se tienen en cuenta el torque generado, los gases de escape, el sistema de combustible, el consumo de combustible y la potencia mecánica. Además, se incluyen sistemas de control por temperatura y frecuencia para mantener a la TG entre los límites de funcionamiento (MAX y MIN). La Figura 2 muestra el modelo completo de la microturbina.

Los parámetros A, B, C, D y E son usados en los bloques que representan el torque y la temperatura de los gases de escape (resaltados en la Figura 2) y fueron calculados mediante la metodología propuesta por Bank *et. al* en [22]. Para el cálculo de estos parámetros se realizaron algunas consideraciones especiales, ya que los procesos de compresión y expansión no son

isotrópicos, por lo cual se estimó la eficiencia del combustor y de la turbina en 80%. Además, se debe tener en cuenta que el biogás no puede realizar una combustión completa ya que el CO₂ ocupa un espacio en la cámara de combustión y no aporta energía [29]. Los valores restantes fueron obtenidos de estudios similares [26], [30] y se presentan en la Tabla 3.

Figura 2. Modelo de Rowen para una micro-turbina en Matlab/Simulink. Adaptado de [21], [22], [31]

Tabla 3. *Parámetros del modelo presentado en la Figura 2 para la turbina C30. Adaptado de [22]*

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Constante para el bloque de torque de salida	A	-0,5277	-
Constante para el bloque de torque de salida	B	1,5277	-
Constante para el bloque de torque de salida	C	0,5	-
Constante para el bloque de Temperatura de escape	D	421,06	°C
Constante para el bloque de Temperatura de escape	E	165	°C
Límite máximo de señal de demanda de combustible	MAX	1,5	Pu
Límite mínimo de señal de demanda de combustible	MIN	-0,13	Pu
Temperatura nominal de escape	TR	275	°C
Eficiencia del compresor	11c	0,8	-
Eficiencia de la turbina	11t	0,8	-
Potencia del Generador	S	0,030	MW

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Aplicando el modelo de transformación y el ADM1 se calculó la producción de biogás durante 100 días, teniendo en cuenta una tasa de carga orgánica homogénea. Bajo esta consideración un sistema de DA puede llegar a generar 123 m³/día de biogás (ver Figura 3), con una concentración de casi el 50% de CH₄. Con esta composición de metano el poder calorífico aproximado del biogás es de 13320 kJ/kg [32].

Figura 3. Producción de biogás

Por otro lado, para verificar el funcionamiento del modelo y el esquema de control de la turbina se realizó una prueba con un escalón unitario de 0,9% que hiciera que el sistema sobrepasara la temperatura máxima. En la Figura 4 se pueden observar la respuesta de la turbina en estado estacionario $t < 5$ [s] (potencia mecánica 0,825 y temperatura 226 °C) y su comportamiento ante el escalón unitario de 0,9% aplicado en $t = 5$ [s], donde se evidencia como la perturbación produce un aumento de la temperatura de los gases de escape. Posteriormente en $t = 22$ [s] el control de temperatura actúa y se reduce la potencia de salida hasta que la temperatura se normaliza al valor de referencia (275 °C).

Figura 4. (a) Potencia mecánica y (b) Temperatura de los gases de escape

Una vez configurado todo el esquema de conversión biogás-electricidad (ver Figura 1), se evaluó su comportamiento cuando se conecta al sistema de ge-

neración eléctrica una carga trifásica de 25 kW. En la Figura 5 se observa que la potencia mecánica y la demanda de combustible tienen una respuesta oscilatoria, mientras el sistema vence la inercia del generador y alcanza su estado estacionario.

En este caso, la demanda de combustible puede ser usada para estimar el tiempo de funcionamiento de la microturbina si se supone que esta trabaja continuamente en su valor de estado estacionario, el cual puede observarse luego de los primeros 10 segundos de operación (0,0305 kg/s).

Figura 5. (a) Potencia mecánica y (b) Demanda de combustible

Para obtener el tiempo de funcionamiento de la microturbina se convirtió el combustible disponible a unidades de masa [kg/día] siguiendo el método propuesto en [14]. Para el escenario de aplicación presentado en este trabajo, la cantidad de biogás generado fue 123,4 m³/día, el cual está compuesto por 61,7 m³/día de CH_4 y 55 m³/día de CO_2 . Usando otras salidas del ADM1 como la presión parcial de los gases y la concentración de los mismos, es posible convertir estos volúmenes a unidades de masa, obteniendo como resultado 38,98 kg/día de CH_4 más 95,69 kg/día de CO_2 .

Posteriormente, se dividió la masa total del biogás producido por la demanda de combustible (0,0305 kg/s), lo cual dio como resultado un tiempo de funcionamiento aproximado de 122 horas (44200 segundos). Finalmente, para una carga de 25 kW se puede estimar que el biogás producido durante 100 días es capaz de suministrar una energía de 3066 kWh (122*25 kW). En la Figura 6 se pueden observar por un lado la señal de tensión con frecuencia de 1600 Hz producto de la velocidad de giro y un solo par de polos en el generador sincrónico, y por otra parte, la señal de 60

Hz luego de pasar por el conversor AC-DC-AC con una tensión de salida final de 312 Vpico.

Figura 6. (a) Tensión en los bornes del generador a 1600 Hz y (b) Tensión sobre la carga 60 Hz

CONCLUSIONES

A partir de los resultados de este trabajo se muestra que las microturbinas de gas son máquinas ideales para el proceso de conversión biogás electricidad ya que pueden funcionar con este biocombustible inclusive si tiene contenidos de metano del 50%. Además, usar este tipo de tecnologías de conversión representa un ahorro en el costo de inversión de un sistema de generación de electricidad, ya que las turbinas son más resistentes a combustibles como el biogás y a sus trazas de ácido sulfhídrico. Esto es aún más relevante si se compara con otras tecnologías de conversión que requieren etapas de filtrado y purificación más estrictas para el biogás. Los resultados de simulación muestran que el uso de modelos matemáticos tanto para el proceso de DA como para el proceso de conversión biogás-electricidad facilitan la estimación del recurso energético disponible y el potencial de generación de electricidad que se puede obtener a partir del uso de diversas tecnologías de conversión. Todo esto, sin incurrir en gastos previos, pruebas preliminares o la implementación de sistemas de conversión a partir de pruebas de ensayo y error. En Colombia el uso del biogás es una buena alternativa energética para las zonas rurales o no conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN), pues ofrece una solución integrada a problemas ambientales, sociales, energéticos y de salud pública. Es importante resaltar que en el país existen industrias agropecuarias que producen grandes cantidades de biomasa residual, la cual posee un alto po-

tencial energético cuando se convierte en biogás mediante la DA. Sin embargo, debido al desconocimiento y a la falta de difusión de las tecnologías asociadas a la conversión biogás-electricidad o biogás-calor, pocos proyectos de este tipo se ejecutan actualmente. El objetivo de este trabajo, además de presentar una perspectiva técnica al proceso generación de electricidad basada en biogás, busca visibilizar la oportunidad que tiene Colombia en el desarrollo de sistemas de este tipo y su inclusión permanente en la matriz energética del país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Deublein and A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Deggendorf: WILEY-VCH, 2008.
- [2] J. Sadhukhan, "Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches," *Appl. Energy*, vol. 122, pp. 196–206, 2014.
- [3] M. S. Islam, A. Islam, M. Z. Islam, and E. Basher, "Stability analysis of standalone biogas power plants in poultry farms of Bangladesh," in *2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, 2014, pp. 1–6.
- [4] Y. Shen, J. L. Linville, M. Urgun-Demirtas, M. M. Mintz, and S. W. Snyder, "An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 346–362, Oct. 2015.
- [5] C. Gissén, T. Prade, E. Kreuger, I. A. Nges, H. Rosenqvist, S.-E. Svensson, M. Lantz, J. E. Mattsson, P. Börjesson, and L. Björnsson, "Comparing energy crops for biogas production – Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation," *Biomass and Bioenergy*, vol. 64, pp. 199–210, May 2014.
- [6] P. Kumaran, D. Hephzibah, R. Sivasankari, N. Saifuddin, and A. H. Shamsuddin, "A review on industrial scale anaerobic digestion systems deployment in Malaysia: Opportunities and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 929–940, Apr. 2016.
- [7] P. Conil, "Biogas Plants to Renewable Energy Generation and Carbon Certificate Merchandising," *Palmas*, vol. 28, no. 2, pp. 173–179, 2007.
- [8] Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME), *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*, 1st ed. Ministerio de Minas y Energía, 2009.

- [9] Instituto Colombiano Agropecuario, "Censo Pecuario Nacional 2016 ICA." [Online]. Available: <http://www.ica.gov.co/getdoc/9c3ad7df-d7ba-4a6d-8112-563caa9d8b17/Pecuaria.aspx>. [Accessed: 31-Jul-2016].
- [10] K. Boe, *Online monitoring and control of the biogas process*. Citeseer, 2006.
- [11] A. Donoso-Bravo, J. Mailier, C. Martin, J. Rodríguez, C. Aceves-Lara, and A. Vande Wouwer, "Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: a review," *Water Res.*, vol. 45, no. 17, pp. 5347–64, Nov. 2011.
- [12] D. Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S. Kalyuzhnyi, S. Pavlostathis, A. Rozzi, W. Sanders, H. Siegrist, and V. Vavilin, "The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)," *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 65–73, Jan. 2002.
- [13] M. Lübken, M. Wichern, M. Schlattmann, A. Gronauer, and H. Horn, "Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops," *Water Res.*, vol. 41, no. 18, pp. 4085–96, Oct. 2007.
- [14] U. Jeppsson, "Investigation of Anaerobic Digestion Alternatives for Henriksdal 's WWTP," Lund, Sweden, 2007.
- [15] O. Razbani, N. Mirzamohammad, and M. Assadi, "Literature review and road map for using biogas in internal combustion engines," in *Third international conference on applied energy*, 2011, no. May, p. 10.
- [16] P. Weiland, "Biogas production : current state and perspectives," *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 85, pp. 849–860, 2010.
- [17] H. Nikpey, M. Majoumerd, P. Breuhaus, and M. Assadi, "Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 66, no. 1–2, pp. 181–190, May 2014.
- [18] S. Lansing, J. F. Martin, J. Viquez, and R. B. Botero, "Electricity production in small-scale swine and dairy digesters in Costa Rica," in *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2009, ASABE 2009*, 2009, vol. 3, pp. 1569–1587.
- [19] C. H. Coimbra-Araújo, L. Mariane, C. B. Júnior, E. P. Frigo, M. S. Frigo, I. R. C. Araújo, and H. J. Alves, "Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 826–839, 2014.
- [20] Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME), "Presentación general del proyecto UPME – BID para la promoción de las FNCER en Colombia Resumen y principales resultados," *Convenio BID ATN/FM-12825-CO*. Ministerio de Minas y Energía, Bogota, p. 23, 2014.
- [21] W. Rowen, "Simplified mathematic representations of heavy-duty gas turbines," *Eng. power*, pp. 865–882, 1983.
- [22] M. R. Bank Tavakoli, B. Vahidi, and W. Gawlik, "An educational guide to extract the parameters of heavy duty gas turbines model in dynamic studies based on operational data," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1366–1374, 2009.
- [23] Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME), "Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás," Bogota, 2003.
- [24] C. Rosen and U. Jeppsson, "Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework," *Tech. Rep.*, pp. 1–37, 2008.
- [25] U. Zaher, R. Li, U. Jeppsson, J.-P. Steyer, and S. Chen, "GISCOD: general integrated solid waste co-digestion model," *Water Res.*, vol. 43, no. 10, pp. 2717–27, Jun. 2009.
- [26] D. N. Gaonkar and R. N. Patel, "Modeling and Simulation of Microturbine Based Distributed Generation System," in *2006 IEEE Power India Conference*, 2006, pp. 256–260.
- [27] M. A. Rosa do Nascimento, L. de Oliveira Rodrigues, E. Cruz dos Santos, E. E. Batista Gomes, F. L. Goulart Dias, E. I. Gutiérrez Velásques, and R. A. Miranda Carrillo, "Micro Gas Turbine Engine: A Review," *Prog. Gas Turbine Perform.*, pp. 107–141, 2013.
- [28] W. Rowen, "Simplified Mathematical Representations of single-shaft gas turbines in mechanical drive services," in *Turbo Machinery International*, 1992, vol. 33, no. 5, pp. 26–32.
- [29] Y. A. Cengel and M. E. Boles, *Termodinámica*, 7th ed. México, D.F., 2011.
- [30] S. R. Guda, C. Wang, and M. H. Nehrir, "A simu-link-based microturbine model for distributed generation studies," *Proc. 37th Annu. North Am. Power Symp.* 2005, vol. 2005, pp. 269–274, 2005.
- [31] MathWorks, "Gasturbine model for dynamic studies." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47495-gasturbine.zip>. [Accessed: 31-Aug-2016].
- [32] J. Mantilla, J. Aguirre, and L. Sarmiento, "Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible," *Ing. e Investig.*, vol. 28, no. 2, pp. 131–141, 2008.

PROPUESTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SAN ANDRÉS ISLA CON BIOMASA RESIDUAL PORCINA

López Martínez, Germán¹
Gómez Torres, Luisa²

¹ Escuela Tecnológica ITC, Grupo de investigación GEA
² Escuela Tecnológica ITC, Grupo de investigación GEA
germanlopezm@yahoo.es

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

San Andrés cuenta con un sistema de generación de electricidad a base de combustible diésel, requiere de 40 millones de litros para generar 158 GWh.año-1, y satisfacer las necesidades de sus 77.000 habitantes. Por otro lado, tiene una población porcina de 2.223 cabezas, alojados en 205 predios, todos con tecnología de traspatio, produciendo olores molestos, gases de efecto invernadero y lixiviados, si se disponen de una manera inadecuada. La concentración de porcinos alcanza las 89 cabezas por km² y producen 1.210 t.año-1 de estiércol, con los que se pueden generar 613,6 MWh.año-1, mediante biodegradación anaerobia, para producir biogás y usar este biocombustible en motores térmicos para la generación eléctrica. Con esta energía se cubriría un poco menos del 1% de la demanda energética, pero unido a otros sistemas de generación limpia, pueden contribuir al abastecimiento energético de la isla, y a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero.

Palabras claves: *Biomasa Residual Porcina, Biogás, Biometano, Poder Energético, San Andrés.*

INTRODUCCIÓN

Una de las mayores necesidades de la humanidad es la disponibilidad de energía para poder realizar sus actividades, y satisfacer las necesidades diarias.

San Andrés, es la isla principal del archipiélago que lo conforma con las islas de Providencia y Santa Catalina; se encuentra en el mar Caribe, a 800 km de la costa norte Colombiana, sus coordenadas son: 81° 42' de longitud este y 12° 32' de latitud Norte. Es la isla mayor del Archipiélago Colombiano de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; tiene una longitud aproximada de 13 Km, y un ancho máximo de 3 Km y una superficie de aproximada de 25 Km². [1] Su población, en 2016, se estima en 77.101 habitantes [2], para una densidad de 3.084 habitantes por km².

La demanda energética en San Andrés isla es de 158 GWh.año-1, valor relativamente alto en comparación con su tamaño. La principal razón de este consumo es la alta densidad poblacional. La electricidad es generada por una planta eléctrica de 55 MW de potencia, que cuenta con generadores diésel, que consumen más de 40 millones de litros de combustible por año. [3]. Según la dirección de Servicios Públicos y Medio Ambiente de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, el pico o demanda máxima de energía actual en San Andrés es de 31,5 megavatios eléctricos. [4].

Para ampliar la cobertura en el servicio de energía eléctrica en el archipiélago de San Andrés y Providencia, y buscar costos más eficientes en la prestación del mismo, el Gobierno Nacional dispuso emprender un proyecto para reconvertir el parque de generación térmica en el departamento. Esta decisión se tomó en el Consejo de Ministros que condujo el presidente Juan Manuel Santos, en 2014.

Según el Ministerio de Minas y Energía se planea realizar inversiones en San Andrés que permitirán reducir los costos de la energía, ampliar su cobertura y, al mismo tiempo, contribuir al aprovechamiento de las distintas fuentes de energía renovable como la eólica y la que proviene de desechos orgánicos.

"Queremos que el archipiélago pueda lograr un mayor y mejor posicionamiento en el Caribe y por ello estamos buscando una solución energética integral que consiste también en establecer una mejor gobernabilidad de los recursos, para que su inversión se traduzca en un mejoramiento de las condiciones de los habitantes, fundamentalmente de la población más vulnerable".

Esta iniciativa se suma a otros proyectos de aprovechamiento de las energías renovables, que el mismo

Ministerio ha emprendido, al utilizar la energía solar, eólica, hidráulica y energía producida por biomasa en diferentes zonas del país. [5]

Según la Ley 697 de 2001 [6] y el decreto reglamentario 3683 de 2003 [7], donde se promueve e incentiva el uso de las fuentes de energías no convencionales, el uso racional y eficiente de energía para las zonas no interconectadas del país; adicionalmente, el espíritu de la Ley 1715 de 2014, [8] por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, se promueve el uso de diferentes fuentes renovables de energías, entre ellas la biomasa residual agrícola (Artículo 17), y se justifica el empleo de este recurso, en especial por qué, en este caso, se puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mejorar la oferta energética mediante la diversificación de la canasta energética, y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y de lixiviados, elementos altamente contaminantes del medio ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

La biomasa residual porcina. (BRPo) contempla los desechos de los cerdos, los que están conformados por las excretas y los purines que generan diariamente. La generación de purines depende del estado fisiológico del animal, está compuesto por 95% de agua. En la explotación convencional desarrollada en la Isla de San Andrés, (traspatio), los cerdos son mantenidos sobre el piso, por lo general de tierra, lo que genera contaminación de la biomasa residual. El purín contiene excretas líquidas y sólidas, la orina representa aproximadamente el 45% y las heces el 55% del contenido volumétrico, la humedad es cercana al 90% y el contenido de materia seca es aproximadamente 10%. La densidad de la excreta fresca es ligeramente mayor a 1,0 kg.l-1, siendo así, un fluido de peso comparable al agua. [9]. Este residuo tiene valor energético que puede ser transformado, por medio biológico, en biogás, y posteriormente en biometano, estos dos productos son biocombustibles, que pueden emplearse en la generación de calor, o en energía eléctrica, a través de algún ciclo termodinámico de potencia. El biogás tiene concentraciones de metano entre 50% y 70%; mientras que el biometano requiere concentraciones de 97% o más de metano, para ser considerado como tal, esto se logra después de purificar el biogás. [10]

En caso que las excretas generadas por los porcinos no se dispongan de manera adecuada, se convierten en fuentes emisoras de gases y lixiviados que re-

percuten de forma negativa en el medio ambiente. En general, la emisión de estos contaminantes va a estar condicionada por diferentes factores asociados al diseño y mantenimiento de las instalaciones, a la dieta aportada a los cerdos y a la disposición final que se realice de los purines. [11]

A partir del censo nacional porcícola, que desarrolla anualmente el ICA, se determina que en la isla de San Andrés hay 2.223 cabezas, que comprende desde lechones de 1 a 60 días de nacidos hasta hembras de cría de más de 240 días, y machos reproductores de más de 180 días, alojados en 205 predios, todos en la modalidad de explotación en traspatio; en la Tabla 1 se presenta el censo de cerdos en San Andrés isla, a marzo de 2016. [12].

Tabla 1 Censo de porcinos en San Andrés isla, a marzo de 2016. Extraído de ICA 2016 [12]

Lechones 1-60 días	Levante 61-120 días	Ceba 121-180 días	Hembras reemplazo 120-240 días	Hembras cría >240 días	Machos reproductores / reemplazo >180 días	Total porcinos en traspatio 2016
819	622	335	194	205	48	2.223

De acuerdo con el censo de porcinos y del tipo de explotación que se realiza en la isla, se cuenta con un promedio de 10,8 porcinos por predio, valor relativamente bajo, si se compara con granjas tecnificadas que existen en la zona continental del país; sin embargo, debido al tamaño, relativamente pequeño de la isla, 25 km2, se obtiene una concentración de 8,2 predios por km2, y cerca 89 porcinos por km2, valores relativamente altos que permite pensar en algún proyecto de aprovechamiento energético, a través de una red de distribución de biogás, o de biometano, la que podría abastecer una planta de generación de energía eléctrica en algún lugar estratégico, o para consumo térmico en la isla, el cual incluye la posibilidad de emplearlo como biocombustible en vehículos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para estimar el potencial energético de la BRPo en la isla de San Andrés, se consideran la cantidad y tipo de porcinos, (Tabla 1), la producción de excretas y biogás diario, (Tabla 2), y el poder calorífico inferior (PCI), del biogás generado, que para este caso en concreto se considera la generación de biogás con 60% de metano, que corresponde a un valor típico de 6 KWh.m-3. [13]

En la Tabla 3, se presenta el cálculo del potencial energético de la BRPo en San Andrés isla, que corresponde a 613,6 MWh.año-1, lo que representa un poco menos del 1% que actualmente se consume en la isla, valor relativamente bajo, pero que sumado a otros proyectos con energías renovables, como la generación a partir de los residuos sólidos urbanos (RSU), planta de 1,6 MW de potencia inaugurada en el mes de junio de 2013, [15], o posibles proyectos de electrificación solar fotovoltaica, o de energía eólica, [16], será posible lograr los propósitos de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, mejorar la oferta energética, mediante la diversificación de la canasta energética, y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, gases y lixiviado, elementos altamente contaminantes

Tabla 2. Producción diaria estiércol y biogás en porcino. Elaboración propia a partir de SITIOSOLAR. [14]

Tamaño animal	Estiércol (kg.d ⁻¹)	Biogás (m ³ .d ⁻¹)
Pequeño	1,0	0,07-0,10
Mediano	1,5	0,10-0,14
Grande	2,0	0,14-0,19

Se consideran valores de volumen de biogás generados diariamente por cada porcino, según las recomendaciones del estudio de Sitio Solar, tal como se muestra en la Tabla 3; en ella se detallan las cantidades diarias de volumen de biogás generado, hasta 280,2 m3 de biogás por día, considerando la totalidad de porcinos; en la última columna, se muestra el potencial teórico anual de la BRPo, que corresponde a 613,6 MWh.año-1, valor que concuerda con estudios similares [17], [18], [19]

Tabla 3. Potencial de biomasa residual porcina en San Andrés año 2016. Extraído de Elaboración propia a partir Censo Pecuario, [12], y datos técnicos [14]

Tipo porcino	Porcinos total	Produce excretas (kg.d ⁻¹)	Produce biogás (m ³ .d ⁻¹)	Excretas totales (t.año ⁻¹)	Biogás total (m ³ .d ⁻¹)	MWh. año ⁻¹
Lechón 1-60 días	819	1,0	0,09	299	73,7	161,4
Levante 61-120 días	622	1,5	0,12	341	74,6	163,5
Ceba 121-180 días	335	2,0	0,14	245	46,9	102,7
Hembras reemplazo 120-240 días	194	2,0	0,19	142	36,9	80,7
Hembras cría más 240 días	205	2,0	0,19	150	39,0	85,3
Machos reprd +reempl más 180 días	48	2,0	0,19	35	9,1	20,0
TOTAL	2.223			1.210	280,2	613,6

Por la disposición de los 205 predios, es posible pensar en construir biodigestores en cada uno de ellos, o en parejas de predios cercanos, y desarrollar una red de tuberías de distribución del biogás, o de biometano generado, para conducirlo a un único punto, donde se instale una planta generadora de energía eléctrica, para alimentar motores térmicos (micro-turbinas de gas, motores de CI, o calderas de vapor para mover turbinas) tecnologías que ya ha sido probada en países industrializados como Alemania, China, Japón y Estados Unidos; otros usos posibles del biocombustible obtenido, es combinarlo con procesos de calefacción o biocombustible para transporte. [20].

Para implementar esta tecnología, se requiere de construir biodigestores, que transforman la BRPo en biogás, para lo cual se requiere de un lapso de 30 a 60 días a la temperatura ambiente (25°C). Las adaptaciones que se deben considerar en cada predio, pasa por adecuar el piso de la explotación para permitir la recolecta adecuada de la BRPo, y el cargue de forma continua del biodigestor; adicionalmente, la cercanía de los predios permite la construcción de una red de distribución. Ahora, el biometano se obtiene a partir de la realización de un proceso de purificación del biogás, para obtener un gas con 97% o más de concentración de metano, dándose la posibilidad de usar la misma red de distribución de gas natural, si este existiera; este proceso se debe realizar en cada predio antes de inyectarlo a la red de distribución.

La recolección y transporte del biogás, o del biometano, hacia una central de generación eléctrica es completamente factible de implementar por la proximidad de todos los predios, ya que se encuentran en un área relativamente pequeña de 25 km². El biogás o el biometano generado, se utiliza para el accionamiento de motores de combustión, turbinas de gas, hornos, calderas, estufas, celdas de hidrogeno, o como biocombustible para aprovechar el calor para la generación eléctrica, o para otros usos como la calefacción o el transporte.

Cerca de 1 m³ de biogás equivale a: 0,58 litros de Kerosén, 0,5 – 1,5 Kg de leña, 0,61 litros de gasolina, 0,74 Kg de carbón vegetal. [21]

CONCLUSIONES

La isla de San Andrés cuenta con índices como 8,2 predios por km², y cerca 89 porcinos por km², que permiten pensar en la construcción de una red de generación de biogás o de biometano a partir de BRPo

para conducirlo a una central de generación eléctrica. La posibilidad de transformar el biogás en biometano, brinda la opción de contar con un biocombustible con los que se pueden generar hasta 613,6 MWh.año⁻¹ de energía eléctrica limpia, colaborando así a disminuir parcialmente con la dependencia energética a partir de combustibles fósiles, además de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y de lixiviados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, (ET-ITC), por su apoyo en el desarrollo de esta investigación, cuyos resultados obtenidos hasta ahora han permitido participar en el Tercer Congreso de Energía Sostenible

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IGAC, «Mapas de Colombia,» 10 03 2016. [En línea]. Available: <http://www.igac.gov.co:10040/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/MapasdeColombia/Mapas/Departamentales>.

[2] DANE, «Gobernación de San Andres Islas,» 15 02 2016. [En línea]. Available: http://www.sanandres.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=826&Itemid=154.

[3] Universidad de Friburgo en Breisgau, «Análisis preparatorio para suministro de energía sostenible en las islas Colombianas San Andres y Old providence,» 28 11 2005. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/174523434/Energia-San-Andres-Informe-GTZ-Generacion-San-Andres-Primera-Parte-Tra-duccion-EEDAS>. [Último acceso: 3 06 2016].

[4] PORTAFOLIO, «Seguir mejorando el servicio de energía, piden los san andresanos,» *PORTAFOLIO*, pp. <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/seguir-mejorando-servicio-energia-piden-sanandresanos-48712>, 2014.

[5] IPSE, «Boletín de prensa,» IPSE, Bogotá, 2013.

[6] Congreso de Colombia, «Régimen legal,» Congreso de Colombia, 3 10 2001. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4449>. [Último acceso: 22 11 2015].

[7] Presidencia de Colombia, «Régimen Legal de Bogotá,» Diario Oficial, 19 12 2003. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=11032>. [Último acceso: 22 09 2015].

[8] Congreso de Colombia, «Publicaciones UPME,» UPME, 13 05 2014. [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf. [Último acceso: 01 03 2015].

[9] J. M. Peralta, «Sistemas de tratamiento de residuos ganaderos y eficiencia en la reducción de contaminantes,» INIA Carillanta, santiago de Chile., 2011.

[10] Ainia. El biometano, una alternativa energética sostenible para el coche. <http://tecnoalimentalia.ainia.es/web/tecnoalimentalia/ultimas-tecnologias/-/articulos/rT64/content/el-biometano-una-alternativa-energetica-sostenible-para-el-coche>. Feb 2012

[11] Universo Porcino, «Universo Porcino, El Portal del Cerdo,» 10 09 2011. [En línea]. Available: http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/actualidad_porcina_09-2011_emision_de_gases_contaminantes_en_una_explotacion_porcina.html. [Último acceso: 14 07 2016].

[12] ICA, «Censo pecuario nacional,» 15 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.ica.gov.co/getdoc/8232c0e5-be97-42bd-b07b-9cdbfb07fcac/Censos-2008.aspx>.

[13] Naskeo Environment, «The biogas,» 12 10 2009. [En línea]. Available: http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html. [Último acceso: 20 08 2016].

[14] SITIOSOLAR, «La obtención de combustible a partir de materia orgánica de deshecho: La biomasa y el biogás,» 30 07 2013. [En línea]. Available: <http://www.sitiosolar.com/la-obtencion-de-combustible-a-partir-de-materia-organica-de-deshecho-la-biomasa-y-el-biogas/>. [Último acceso: 22 05 2016].

[15] El Isleño, «La nueva planta RSU: ¿otro elefante blanco?,» *La nueva planta RSU: ¿otro elefante blanco?*, p. 1, 24 junio 2013.

[16] IPSE, «Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas,» IPSE, 10 02 2015. [En línea]. Available: <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/612-soluciones-energeticas-para-san-andres>. [Último acceso: 29 07 2016].

[17] Energía obtenida a partir de biomasa Emilio Cerdá Tena. Localización: Cuadernos económicos de ICE, ISSN 0210-2633, N° 83, 2012, págs. 117-140

[18] R. Flores*, R. Muñoz–Ledo, B. B. Flores y K. I. Cano Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio, Revista mexicana de ingeniería química versión impresa ISSN 1665-2738. Rev. Mex. Ing.Nuím vol.7 no.1 México abr. 2008

[19] Análisis de la producción potencial de energía con Biomasa en la región de Andalucía (España) utilizando Sistemas de Información Geográfica Javier Dominguez et M. Jesus. Marcos. <http://cybergeogeo.revues.org/> 2012

[20] GBA- German Biogas Associaton, «Exemplary bioenergy village-no fairytale but a modern success story,» *Biogas Journal*, vol. 1, n° 4, p. 42, 2016.

[21] Moreno, B, “Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias”. Universidad Nacional del Litoral. Santafé Argentina. Julio 2014. <http://biblioteca-virtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/572>.

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS PRODUCIDOS EN LA INDUSTRIA DEL CAFÉ: OBTENCIÓN DE BIOETANOL

Amorocho-Cruz., Claudia M.¹
Sánchez-Ramírez., Javier E.^{1,2}
Triviño P., Jairo S.¹
Contreras G., Jose ¹

¹ Universidad Surcolombiana, Grupo de investigación Agroindustria-USCO
² Dpto I+D Depuración de Aguas del Mediterráneo (DAM)
claudiamilena.amorocho@usco.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

Este estudio presenta los resultados preliminares obtenidos en el laboratorio, con el fin de evaluar el aprovechamiento de los residuos del café (pulpa y el mucilago) de la variedad Castilla para la producción de bioetanol. Actualmente el proyecto se encuentra en la fase de puesta en marcha de los ensayos experimentales, los cuales consisten en evaluar los parámetros ambientales y operacionales que afectan el proceso fermentativo, usando como sustrato residuos de la industria del café específicamente pulpa y mucilago. Los residuos empleados en los ensayos iniciales fueron recolectados en el primer semestre del año en curso y tratados directamente en el laboratorio. Se realizó la puesta en marcha de 3 ensayos y se evaluó el proceso de fermentación natural a temperatura ambiente durante 20 días. Posteriormente mediante destilación simple se cuantificó la cantidad de bioetanol obtenido. Para el estudio experimental se usaron tanques de fermentación con un volumen de 1 litro para cada residuo (mucilago y pulpa), sistemáticamente se realizó el seguimiento de los parámetros fisicoquímicos en diferentes días, con el fin de evaluar el proceso biológico. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran que con la metodología empleada es posible obtener alcohol al 10% y residuos biodegradables que pueden ser empleados como enmienda agrícola.

Palabras clave: Fermentación, pulpa, mucilago, bioetanol, proceso biológico.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del proyecto se realiza bajo el concepto de “biorrefinería”, el cual establece que es posible obtener diversos compuestos de valor añadido a partir de residuos provenientes de la agricultura, la industria de alimentos y la industria agroalimentaria en general. La biorrefinería trata de potencializar en la no utilización como materia prima cultivos susceptibles de convertirse en alimentos sino por el contrario modificar la cadena de producción habitual para generar productos que tienen un interés comercial elevado como productos químicos o como biocombustibles para generar energía o calor [1]. Albert Einstein, estaba en lo correcto, “se puede convertir la materia en energía”.

El desarrollo de la sociedad se ha basado en el aprovechamiento de fuentes energéticas de tipo primaria como el carbón, petróleo y gas natural. Su uso intensivo ha generado un deterioro ambiental en todos los ámbitos que si no se toman correctivos se puede llegar a niveles críticos [2]. Hay evidencias claras de la degradación de los ecosistemas como son: el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono y las lluvias ácidas, por lo que se debe desarrollar otras fuentes energéticas que sustituyan a las convencionales [2]. Actualmente el 84% del consumo total mundial de energía primaria proviene de los combustibles fósiles, sin embargo las reservas de petróleo y de gas natural se están agotando por lo que ha perdido protagonismo por sus fluctuaciones en sus precios y constantes demandas en la economía mundial (pone muchas dificultades), los biocombustibles por el contrario poco a poco han ganado presencia [3].

El café es uno de los productos agrícolas de mayor importancia de producción en Colombia [4], ha sido reconocido mundialmente por la producción en calidad y en cantidad. En las fincas del sur del Huila se ha cultivado una variedad de los mejores café del mundo calificados por la prueba de la taza. Este calificativo es otorgado por la organización que se encarga de premiar a los productores del mejor grano de café en Colombia y varios países de Latinoamérica. De este modo, el café del Huila es admirado y demandado por diversos países del mundo tales como: Japón, Italia, España y en general en Europa y Estados Unidos [5] en donde el café del Huila se ha ganado cuatro premios desde el 2005 [6].

En la producción de café existen dos residuos que se generan en el beneficio húmedo del café pulpa y mucilago [7]. En el proceso de obtención de café [8], la pulpa es el primer subproducto que se obtiene en el beneficio húmedo del café, con cerca de 43.6% en base

húmeda del peso del fruto fresco, el mucilago se genera en la etapa del desmucilaginado, y en base húmeda representa alrededor de 14.85% del peso del fruto fresco. Estos dos residuos son muy contaminantes debido a la elevada cantidad de materia orgánica que suelen aportar a los medios receptores (Ríos, lagos etc.), siendo necesario su tratamiento o reutilización [9].

Actualmente hay preocupaciones sobre el uso de los recursos y los impactos generados en la transformación de los bienes y servicios, por esta razón se han realizado numerosos estudios sobre el uso, aprovechamiento de estos residuos a nivel mundial [10] que permitan obtener mediante el tratamiento de estos residuos subproductos con un valor añadido, dando solución a una problemática y generando beneficios ambientales y económicos [11]. En la región del Huila no se ha implementado ningún tipo de tratamiento a estos residuos y por tanto, el impacto ambiental en las fuentes hídricas es bastante preocupante.

Se presenta el siguiente trabajo para implementar el concepto de Biorrefinería, utilizado actualmente a nivel mundial; las características físico-químicas del mucilago y la pulpa. Según Puerta [12] obtuvieron 63% de azúcares reductores para el mucilago y para la pulpa se reporta según Rodríguez [13], teniendo en cuenta el contenido medio en base seca de 17.31% para azúcares reductores del café, siendo susceptibles de ser tratados mediante procesos biológicos e incorporarlos dentro de una serie de etapas para su aprovechamiento; una de las alternativas para la reutilización de estos residuos, es la producción mediante procesos fermentativos de alcoholes comercialmente interesantes y la producción de biogás mediante procesos anaerobios para producir energía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los análisis fueron desarrollados en el laboratorio del grupo de investigación Agroindustria-USCO de la Universidad Surcolombiana (Huila). Para el estudio de la valoración energética de los residuos generados en el beneficio húmedo del café (Pulpa y mucilago) se ha tenido en cuenta el protocolo descrito por la AOAC y los análisis descritos en el standard methods [14]. Los residuos utilizados, los parámetros analíticos determinados y los materiales empleados se describen a continuación:

Residuos

Pulpa: la materia prima se obtuvo del proceso del despulpado, luego de colocar el café cereza en la tolva,

se vierte en el triturador, donde la pulpa es eliminada de los granos de café; estos residuos serán obtenidos *in-situ* y transportados al laboratorio, se realizaron dos tratamientos con levadura comercial y sin levadura, donde se realiza caracterización físico-química en los diferentes días de fermentación anaerobia. Finalmente se procede a realizar destilación simple, y se cuantifica la cantidad de bioetanol obtenido.

Mucilago: la materia prima se obtuvo del proceso del desmucilaginado, luego de salir el café del proceso de despulpado, el café pasa al desmucilaginator, donde es extraída la mucosidad de los granos de café; estos residuos fueron obtenidos *in-situ* y transportados al laboratorio, se realizaron dos tratamientos con levadura comercial y sin levadura, se hizo caracterización físico-química en los diferentes días de fermentación anaerobia. Finalmente se procede a realizar destilación simple y se cuantifica la cantidad de bioetanol obtenido.

Propiedades físicas de los residuos

Los parámetros físicos peso, aspecto, tamaño, olor y color fueron determinados mediante la siguiente metodología: El color con el colorímetro Konika Minolta, serie CR-410; consiste en colocar el equipo en contacto directo sobre la muestra, se acciona el botón de medición, el equipo emite una luz de xenón pulsante y las longitudes de onda emitidas por la muestra, son transcritas por el colorímetro a valores del espacio de color seleccionado, como $L^*a^*b^*$, la coordenada L^* describe luminosidad, y las coordenadas a^* y b^* describen tonos entre rojo-verde y amarillo-azul, respectivamente.

Análisis de propiedades químicas

Las técnicas analíticas utilizadas en este trabajo corresponden a las descritas en el Standard methods (APHA, 2005) y los métodos oficiales de la AOAC para la determinación de: Sólidos, pH por el método potenciómetro (AOAC-981.12), grados Brix por el método del refractómetro (AOAC-932.12), acidez por el método (AOAC-942.15), azúcares totales por el método del refractómetro (AOAC-932.12).

Equipo de destilación

Al final del proceso de fermentación de la pulpa y el mucilago; se llevó a un proceso de destilación simple con 500 ml de pulpa y mucilago. La temperatura óptima para la obtención del bioetanol fue de 78°C. Una vez obtenido el volumen de destilado se determinó los

grados °Brix, estos se relacionaron con la cantidad y grado de alcohol en cada uno de los experimentos realizados utilizando pulpa y mucilago.

La metodología empleada consistió en el tratamiento en laboratorio del café recolectado mediante el beneficio húmedo y la posterior obtención de la pulpa y el mucilago. Después, a la pulpa y el mucilago se le determinaron los grados Brix, sólidos, peso, color y pH, de acuerdo a la metodología mencionada anteriormente. Los residuos pulpa, pulpa triturada y mucilago se transvasaron a tanques de fermentación de 1 litro, se homogenizó de forma manual, se taparon los tanques y se fermentaron las muestras de forma natural durante 20 días. Al final el periodo de fermentación, se separó el sobrenadante de la fermentación y se realizó la destilación simple hasta la obtención del bioalcohol.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos hasta el momento han permitido evaluar algunos parámetros ambientales y operacionales que afectan el proceso fermentativo natural, usando como sustrato residuos de la industria del café específicamente pulpa y mucilago. Los residuos empleados en los ensayos iniciales fueron recolectados en el primer semestre del año en curso y tratados directamente en el laboratorio. Se realizó la puesta en marcha de 3 ensayos y se evaluó el proceso de fermentación natural a temperatura ambiente durante 20 días.

Posteriormente mediante destilación simple (Figura 1) se cuantificó la cantidad de bioetanol obtenido empleando como sustrato pulpa o mucilago. Se usaron tanques de fermentación con un volumen de 1 litro para cada residuo (mucilago y pulpa), sistemáticamente se realizó el seguimiento de los parámetros pH, °Brix, acidez y color para los días 0, 8, 15 y 20 días con el fin de evaluar el proceso biológico. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran que con la metodología empleada es posible obtener alcohol al 10% y residuos biodegradables que pueden ser empleados como enmienda agrícola.

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos en la caracterización inicial de los residuos tratados en el presente estudio. Se observa que las muestras contienen bajos pH característicos de este tipo de residuos. Con respecto a los grados °Brix y que representan el cociente total de materia seca (generalmente azúcares) disuelta en un líquido, muestra que el mucilago contiene una mayor concentración de azúcares susceptibles

de ser fermentados. La pulpa de café presenta los mayores valores de I^* , a^* y b^* .

Tabla 1. Caracterización de los residuos del café (Pulpa y Mucilago).

Caracterización de los residuos tratados (pulpa y mucilago)									
Muestra	T1 (Pulpa)			T2 (Pulpa triturada)			T3 (Mucilago)		
Peso (g/l)	3,04			4,02			4,58		
pH	4,7	4,7	4,7	4,5	4,5	4,5	4,7	4,7	4,7
°Brix	3,1	3,1	3,1	7	6,8	6,7	12,8	12,9	12,9
Acidez	8,1			8,3			8,1		
Color	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I^*	33,9	33,9	33,9	27	26,8	26,7	29,6	29,4	29,4
a^*	8,1	8,1	8,2	4,4	4,6	4,9	2,3	2,4	2,3
b^*	11,1	11,1	11,1	2	2,2	2,6	3,31	3,09	3,06

En la Figura 1, se muestran la evolución del pH durante el proceso de fermentación llevado a cabo de forma natural de los tratamiento T1-Pulpa, T2-Pulpa Triturada y T3-Mucilago, en estos ensayos el pH se mantuvo en valores entre 3.1–4.1. El montaje estaba provisto con un sistema de captación de gases adaptado en la tapa del recipiente con el fin de garantizar condiciones anaerobias.

Figura 1. Evolución del pH durante la fermentación.

La Figura 2 muestra la evolución de los grados °Brix de los tratamientos T1-Pulpa, T2-Pulpa Triturada y T3-Mucilago; los °Brix presentes en el jugo fermentado de la pulpa, en el cual se encuentra azúcares, ácidos y sales entre otros compuestos solubles en agua. En los estudios se observó que los tratamientos con mayor contenido de °Brix en el jugo fermentado fueron los que mostraron menor rendimiento de alcohol y menor valor de pH. La Figura 3 muestra el montaje experimental empleado en este estudio para el estudio de la fermentación natural.

Figura 2. Evolución de los °Brix durante la fermentación.

Dentro de los objetivos del proyecto se espera poder ajustar los parámetros operacionales que afectan el proceso fermentativo con el fin de maximizar la cantidad de bioetanol obtenido. Además, estudiar el proceso de fermentación mediante el uso de levaduras nativas y levaduras comerciales. Los procesos planteados en este estudio pueden ser de gran interés y el punto de partida para dar soluciones medioambientalmente viables al sector cafetero, enfocadas al tratamiento y aprovechamiento de los residuos generados en la industria del café.

Figura 3. Montaje experimental (Ensayos con pulpa y mucilago)

Los resultados anteriores se encuentran en concordancia con lo reportado por Gonzales [15] donde se observan valores de los grados Brix del mucilago entre (5,5 - 6,0) y se menciona que si el mucilago es fresco se obtienen valores mayores. Respecto a lo obtenido en este estudio, el mucilago fresco tiene valores de grados Brix de casi el doble (12,8). Es decir, en nuestro caso existe una mayor cantidad de azúcares susceptibles de ser transformados a bioetanol. Por otra parte

Gonzales también menciona que a partir de 800 ml de mucilago fresco y una fermentación natural es posible obtener entre 0,8-1,4 ml de etanol. En este estudio se observó que a partir de 1000 ml de mucilago fresco es posible obtener 1 ml de etanol.

En el caso de la pulpa fresca la mayor cantidad de grados Brix obtenidos fue de 7 similar a los obtenidos por Cárdenas [16], quien indica que es posible obtener valores entre 7 y 14 para la pulpa fresca. Los resultados que se muestran en la Figura 2 indican que a lo largo del ensayo los grados Brix disminuyen hasta que se estabilizan. Según Cárdenas, durante el proceso de fermentación natural y a temperatura controlada (18 - 22°C) los grados Brix disminuyen hasta estabilizarse tal y como se observó en este ensayo. Este hecho indica que existe una degradación de los azúcares por parte de los microorganismos fermentativos hasta Bioetanol y cuando estos se agotan el proceso se ralentiza.

Finalmente, mencionar que para que el balance energético de la producción de bioetanol a partir de los residuos del café sea viable, es necesario tratar las vinazas generadas en el proceso de fermentación. En este estudio está previsto la caracterización de estas vinazas y el estudio de la cantidad de metano que podría obtenerse en un tratamiento posterior de digestión anaerobia.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es posible aprovechar los residuos generados en el beneficio húmedo del café para la obtención de productos de valor añadido como el bioetanol. En los ensayos realizados se observó que los tratamientos con mayor contenido de grados °Brix fueron los que mostraron menor rendimiento de alcohol y menor valor de pH. Además, con los residuos tratados y la metodología empleada es posible obtener alcohol al 10% y residuos biodegradables (Vinazas) que pueden ser empleados como enmienda agrícola o como sustrato para la obtención de biogás. En general, es posible reducir el volumen de residuos generados en la industria del café. El estudio en general pretende optimizar la cantidad de bioetanol que puede producirse mediante el aprovechamiento de los residuos generados en la producción de café (pulpa y mucilago). Dentro del proyecto se espera optimizar la producción de bioetanol mediante ensayos de fermentación que se llevaran a cabo empleando levaduras nativas y comerciales. Finalmente se determinará cual es el más apropiado o eficiente en términos de producción de

bioetanol. Por último se estudiara el potencial que tienen las vinazas para la producción de biogás.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Surcolombiana y al grupo de investigación Agroindustria- USCO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Gómez Millán, «Desarrollo de biorrefinerías en el mundo,» ResearchGate (Ciencia y desarrollo), pp. 1-13, 2015.
- [2] F. Posso, «Estudio del desarrollo de las energías alternativas en Venezuela,» ANALES de la Universidad Metropolitana, pp. 147-164, 2004.
- [3] J. I. García Laureiro, Interviewee, Cienciae.com. [Entrevista]. 29 09 2014.
- [4] B. d. l. republica, «Productos más representativos de la economía colombiana,» Banco de la República, 2015. [En línea]. Available: http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/productos_economia_colombiana. [Último acceso: 30 09 2016].
- [5] P. Colombia, «Acuerdo comercial con la Unión Europea,» Proexport, vol. Faciculo coleccionable 2 de 4, pp. 1-31, 2016.
- [6] Café de Colombia al 100%, «Edición Nro25,» 08 2012. [En línea]. Available: http://www.cafedecolombia.com/bb-fnc-es/index.php/comments/arnulfo_leguizamo_el_hombre_que_subasto_su_cafe_en_usd_45.10_lb. [Último acceso: 3 12 2015].
- [7] N. Kondamudi, S. K. Mohapatra y M. Misra, «Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. Journal of agricultural and food Chemistry (56):11757-11760,» 2008.
- [8] Calle V., H., «subproductos del café,» Cenicafé, Boletín Técnico No. 6., p. 84, 1977.
- [9] N. Rodríguez Valencia y D. A. Zambrano Franco, «Los subproductos del café: Fuente de energía renovable,» Avances técnicos 393, CENICAFÉ, 2010.
- [10] R. Rathinavelu y G. Graziosi, «Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café,» ICS-UNIDO, Science Park, Padriciano, Trieste, Italia; Departamento de Biología de la Universidad de Trieste (Italia), 2005.

[11] M. S. Sánchez, «Energías renovables: conceptos y aplicaciones WWF,» Fundación Natura, p. 153, 2003.

[12] G. I. Puerta Quintero y S. Ríos Arias, «Composición Química del mucílago de café según el tiempo de fermentación y refrigeración,» *Cenicafé* 62(2), pp. 23-40, 2011.

[13] V. Rodríguez, «Avances del experimento QIN-08-02: Obtención de peptinas a partir de la pulpa y el mucilago de café,» Informe anual de actividades 1998-1999, *Cenicafé*, p. 90, 1999.

[14] A. W. Apha, «Standard Methods for the Examination of Wastewater,» American Public Health Association, vol. 21 st ed, pp. part, 8000, 94-100, 2005.

[15] H. M. Gonzales, C. L. Banegas, M. R. F. Caballero, M. E. O. Rivera, N. D. H. Flores , N. Eloy y N. Mejía, «Producción de bioetanol a partir del mucilago de café (*Coffea arábica*. L.),» CURC. UNAH. Comayagua. Honduras. 2011. *Revista Ciencia y Tecnología*, (10), pp. 150-160, 2013.

[16] V. A. Cárdenas Hernández, «Evaluación de la producción de bioetanol a partir de la degradación de la pulpa de café,» 2012.

OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE MEZCLAS DE ACEITE USADO DE COCINA Y ACEITE DE HIGUERILLA

Rodríguez Rodríguez, Diego Alejandro¹
Riesco Avila, José Manuel²
Malagón-Romero, Dionisio¹
Garzón Ramirez, Carlos Alberto¹

¹ Universidad Santo Tomás
² Universidad de Guanajuato
dionisiomalagon@usantotomas.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

En la actualidad la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera (Ricinus communis L) se ha visto restringida debido a los altos costos del aceite vegetal. Una alternativa para disminuir los costos de producción es la mezcla del aceite de higuera con aceite usado de cocina, el cual es más económico. En este trabajo se evaluó la producción de biodiesel a partir de mezclas de aceite de higuera con aceite usado de cocina, las cuales fueron sometidas posteriormente a transesterificación. Inicialmente se caracterizaron los dos aceites empleados. Posteriormente se realizó la mezcla entre el 0% y el 20% de aceite usado con aceite de higuera. Se realizó la transesterificación en las condiciones establecidas previamente: temperatura 60°C, relación molar de 6 mol de metanol/ 1 mol de aceite, empleando hidróxido de potasio (KOH) como catalizador al 1% p/p con respecto al aceite. El mayor rendimiento fue del 99% para la mezcla 85% de aceite de higuera y 15% de aceite usado de cocina. Los resultados obtenidos en la cromatografía de gases muestran una composición promedio de 97,6 de ésteres metílicos, cumpliendo la norma NTC 5444. Por otro lado, el poder calorífico fue de 36645 J/g para la mezcla 85% de aceite de higuera y 15% de aceite usado de cocina. Mediante este trabajo se concluye que es posible, desde el punto de vista técnico, emplear la mezcla de aceite de higuera y usado de cocina para la producción de biodiesel, con lo cual se pueden reducir costos en la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera.

Palabras claves: Biodiesel, Aceite de Higuera, Aceite usado de cocina, Transesterificación

INTRODUCCIÓN

La necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono ha llevado al desarrollo de la industria de biocombustibles [1]. En Colombia se ha implementado la Ley 939 de 2004 mediante la cual se impulsa la producción y utilización de biocombustibles en el país [2]. Gracias a esta política la producción de biodiesel ha llegado a cerca de 500.000 toneladas anuales [3].

El biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera ha sido valorado como un excelente biocombustible para aplicaciones en las cuales se requiera una alta potencia por unidad de volumen, tales como motores de aviones, barcos y en general vehículos de carga pesada [4-5]. Sin embargo el alto costo de este aceite, sumado a su alta viscosidad, ha llevado a que su aplicación industrial se haya visto limitada enormemente [6]. El aceite de higuera pertenece al grupo de materias primas consideradas estratégicas para la producción de biodiesel [7-8], sobre todo debido a que presenta un bajo índice de acidez, yodo y saponificación [9]. En cuanto al rendimiento que se presenta durante la obtención del biodiesel se reportan valores cercanos al 90% [10-17], por lo cual el proceso usando este aceite resulta atractivo desde el punto de vista técnico.

En el presente trabajo, se propone el uso de mezclas de aceite usado de cocina y el aceite de higuera para la producción del biodiesel, con lo cual se espera reducir los costos de producción del biodiesel, y además lograr un alto impacto ambiental al plantear una aplicación industrial para el problema del aceite usado de cocina, y darle utilización a dichos residuos para así no desecharlos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Aceite de higuera fue adquirido a Incorp S.A.S. (INCORP S.A.S, Medellín, Colombia) y el aceite usado de cocina se recolectó en restaurantes de Bogotá. Por otro lado, metanol de 98% de pureza fue comprado a Panreac (Barcelona, España); hidróxido de potasio de 85% de pureza e hidróxido de sodio de 98% de pureza, etanol de 95% de pureza fueron adquiridos a Merck (Darmstadt, Alemania). Solución de fenolftaleína en etanol al 95%, yoduro potásico, cloroformo, reactivo de Wijs, tiosulfato sódico, almidón soluble y ácido clorhídrico fueron adquiridos a J.T. Baker (Center Valley, Estados Unidos).

Metodología

Filtración del aceite usado de cocina

Para eliminar las impurezas presentes en el aceite usado de cocina, las cuales interferirían durante la reacción y se convertirían en material particulado del biodiesel obtenido. Se filtró empleando papel filtro (Whatman 1). Se calentó el aceite a una temperatura de 40°C y se filtró en un embudo de filtración. Una vez filtrado el aceite se guardó en recipientes plásticos, a temperatura ambiente, hasta su uso acorde al diseño experimental.

Caracterización de la materia prima (aceite usado de cocina e higuera)

Densidad :Se determinó mediante la Norma NTC366 empleando un picnómetro de 10 ml, a temperatura ambiente.

Viscosidad :Se utilizó un viscosímetro Cannon LV Modelo 2020 a una temperatura de 40°C.

Índice de acidez : La determinación del índice de acidez se realizó acorde a la NTC 218. La prueba se desarrolló tomando una muestra del aceite la cual se disuelve en una solución de eter dietílico y etanol al 95%, los ácidos libres presentes en la muestra se titularon con una solución metanólica de hidróxido de potasio al 0,1M.

Índice de yodo : Se determinó siguiendo la NTC 283. La prueba consistió en la dilución de 0,2 gramos de ensayo en un solvente y adición de reactivo de Wijs, después se adicionó yoduro de potasio y agua y se tituló la liberación de yoduro con una solución de tiosulfato sódico.

Índice de saponificación : Se siguió la norma NTC 335. La prueba consistió en saponificar completamente 2 gramos del aceite mediante un exceso de solución alcohólica de hidróxido de potasio, valorando luego dicho exceso de solución alcalina con ácido clorhídrico 0,5N.

Diseño experimental.

Se propusieron mezclas que contienen 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 100% de aceite usado en aceite de higuera las cuales fueron trans-esterificadas para la obtención de biodiesel. Las reacciones se realizaron por duplicado.

Reacción de trans-esteficación.

La obtención de biodiesel se realizó en condiciones establecidas previamente [18-19]: relación molar metanol:aceite 6:1, porcentaje de catalizador (hidróxido de potasio) 1%, tiempo de reacción 2 horas. La reacción se llevó a cabo en un reactor de vidrio de 100 ml de capacidad con un volumen útil de 60 ml, donde se mantuvo la temperatura en 60°C con un baño termostatado. Al finalizar el tiempo de reacción se obtuvieron 2 fases: biodiesel y glicerol, por lo cual se colocó la mezcla de reacción en un embudo de decantación. Se permitió la separación de las 2 fases mediante decantación, se recogió la fase superior (rica en biodiesel). Se adicionó un volumen de agua correspondiente a 1/3 del volumen del biodiesel obtenido, se permitió la separación de fases y se descartó el agua. Se repitió el procedimiento hasta lograr que el pH del agua fuera neutro. Se calentó el biodiesel en una plancha de calentamiento hasta una temperatura de 110°C durante 30 minutos para secar y eliminar el agua que pudo haber quedado.

Caracterización del biodiesel

Poder Calorífico

Para esta prueba se utilizó una bomba IKA C 2000 (IKA, Irlanda). Se pesaron muestras cercanas a 1 gramo y se introdujeron en el vaso de la bomba calorimétrica donde se realiza la combustion. El oxígeno empleado se utiliza a una presión máxima de 350 psia.

Cromatografía de gases

Se determinó el contenido de triglicéridos mediante el empleo de un cromatógrafo de gases Varian 450 -GC (Agilent Technologies, China) y una columna BD-EN 1403 (Agilent Technologies, China) de 30 m x 0,320 µm x 0,25µm. La temperatura inicial en el inyector fue 60 °C por 3 segundos, la cual se incrementó con una rampa de 200 °C/min hasta 380 °C y se mantuvo por 22 min. En la columna la temperatura inicial fue de 50 °C durante 1 minuto y luego se incrementó con una rampa de 15°C/min hasta 180°C, seguida de una segunda rampa de 7°C/min hasta 230 °C y finalmente se empleó una tercera rampa de 30°C/min hasta 380 °C donde se mantuvo por 10 min. El detector empleado fue el FID (*flame index detector*), el cual se mantuvo en 380 °C; el gas de arrastre empleado fue hidrogeno con un caudal de 3 ml/min.

Adicionalmente se determinó el contenido de metil-ésteres. Para ello se emplearon similares condiciones a las empleadas en la determinación de triglicéridos, excepto que no se empleó la tercera rampa en la columna de cromatografía. El volumen de muestra inyectado para los dos métodos es de 1 µL en forma manual.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Caracterización de aceites

La caracterización de los aceites se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados caracterización de los aceites.

Aceite	Densidad [g/ml]	Viscosidad [cP]	Índice de acidez	Índice de yodo [g/100 g de sustancia]	Saponificación [mg de KOH/g]
Higuerilla	0,9707± 0,009	215± 1,13	0,5601± 0,020	92,01± 0,01	181,678 ± 1,985
Usado de cocina	0,9119± 0,013	42,2± 1,01	1,0268± 0,016	72,22± 0,05	196,238 ± 0,845

La densidad del aceite de higuerilla obtenida experimentalmente en este trabajo es de 0,9707 g/ml, la cual está dentro del intervalo reportado en la literatura (0,9625 g/ml y 0,9772 g/ml) [20]. El aceite usado de cocina presenta valores reportados de densidad de 0,9115 g/ml [22] y de 0,9156 g/ml [21], comparando estos valores con la densidad obtenida en este trabajo se concluye que no hay una diferencia considerable con lo reportado en la literatura.

En cuanto a la viscosidad absoluta, esta se determinó a una temperatura de 40°C para los dos aceites. Medina [11] reporta un valor de viscosidad de 174,71 cP para el aceite de higuerilla, pero este autor afirma que dicho valor puede variar dependiendo de la fuente de obtención del aceite. En cuanto al aceite usado de cocina, López [20] y Herrera[18] reportan para el aceite usado un valor de 40 cP, valor cercano al obtenido en este trabajo.

El índice de acidez determina los ácidos grasos libres que contiene cada aceite. Estudios como el de Medina [11] reportan un índice de acidez para el aceite de higuerilla de 0,2399. El aceite usado de cocina tiene valores de índice de acidez en el intervalo de 0,2 a 0,824 [22, 23, 24]. Entre mayor es el índice de acidez se concluye que hay un mayor nivel de ácidos grasos

libres presentes en el mismo, por lo cual se puede concluir que el aceite empleado en este trabajo (1,026) presenta un nivel muy alto y se infiere que ha sido sobre-utilizado. Este referente le da un valor agregado al trabajo presentado, ya que indica que su utilización en la alimentación humana o animal es un riesgo y hace ver que la posibilidad de llevar a cabo, a escala industrial, este proyecto tendría un enorme impacto social.

El índice de yodo indica la cantidad de este compuesto que puede adsorber el aceite vegetal en los enlaces insaturados, es decir, que entre mayor sea el valor del índice mayor será la adsorción en los enlaces dobles presentes en el aceite. La literatura consultada presenta valores en el intervalo de 82 a 90 para el aceite de higuera [18] y para el aceite usado de cocina entre 60 a 70 [19], es decir que los valores experimentales obtenidos en este trabajo se encuentran por encima del rango reportado indicando presencia de un mayor número de dobles enlaces que los aceites reportados.

El índice de saponificación indica la cantidad de hidróxido de potasio (KOH) que se necesita para saponificar (convertir en jabón) un gramo de aceite. El rango reportado en la literatura para el aceite de higuera varía desde 176 a 187 mg KOH/g aceite [20], donde se evidencia que el valor obtenido en este trabajo se encuentra dentro de lo reportado. Por otro lado, el valor del aceite usado de cocina reportado es 196,98 mg KOH/g aceite [22], comparando el valor experimental obtenido en este trabajo es similar al reportado en la literatura. Es por ello que una de las aplicaciones que tiene el aceite usado de cocina en Colombia es para la fabricación de jabón.

Obtención de biodiesel

Los resultados obtenidos para la obtención de biodiesel se presentan en la Tabla 2, donde se aprecia el rendimiento y el poder calorífico obtenido para cada una de las mezclas de aceite evaluadas.

Tabla 2. Resultados de rendimiento y poder calorífico del Biodiesel obtenido

Porcentaje de aceite usado de cocina	Rendimiento [%]	Poder Calorífico [J/g]
0%	91,25 ± 0,010	35672 ± 0.006
5%	92,66 ± 0,008	36312 ± 0.002
10%	97,88 ± 0,002	36198± 0.005
15%	99,89 ± 0,001	36645 ± 0.001
20%	95,45 ± 0,007	36150 ± 0.008

Porcentaje de aceite usado de cocina	Rendimiento [%]	Poder Calorífico [J/g]
100%	85,43 ± 0,011	37255 ± 0.005

Como se aprecia en la Tabla 2, en todos los ensayos realizados se obtuvieron rendimientos superiores al 85%. López [21] y López [22] reportan un rendimiento superior del 80% para el aceite usado de cocina y en el caso del aceite de higuera está reportado un rendimiento del 65% [11-13]. Estos resultados muestran que la adición de aceite usado de cocina a la mezcla de aceites no ocasiona una disminución en el rendimiento, por lo cual podría ser reemplazado parcialmente el aceite de higuera por aceite usado.

Poder calorífico

El poder calorífico obtenido para todas las muestras de biodiesel se encuentran en el rango de 35.000 J/g a 38.000 J/g como se muestra en la Tabla 2. En dicha tabla se ve que la presencia del aceite usado de cocina en la mezcla de aceites hace que se incremente el poder calorífico. El biodiesel que tiene el mayor poder calorífico es el producido a partir de solo aceite usado de cocina, seguido por la mezcla de 85% aceite de higuera y 15% aceite usado de cocina. Según lo presentado en la literatura, el poder calorífico del biodiesel a partir de aceite de higuera se encuentra en 36.947.4 J/g [11] y el del aceite usado de cocina se encuentra en 37.520 J/g [10]. Lo anterior ratifica que el biodiesel obtenido cumple con lo reportado y que no hay un cambio considerable en el poder calorífico por la adición de aceite usado de cocina al aceite de higuera.

Cromatografía

Lo presentado en la Tabla 3 evidencia que los ésteres metílicos están en un rango entre 97,4 como mínimo y 98,2 como máximo. En la literatura se reportan valores para el aceite de higuera de 97,69 [18] y para el aceite de cocina usado de 98,38 [20]. Por otro lado, según la norma NTC 5444; el contenido de los monoglicéridos, diglicéridos debe ser de 0,8 y 0,2 como máximo, respectivamente. Como se puede observar en la anterior tabla, el contenido de ésteres metílicos obtenidos en la cromatografía de gases tanto para el aceite de higuera como para el aceite usado de cocina y sus mezclas se encuentran en los rangos establecidos en la literatura. Lo anterior ratifica que la adición de aceite usado de cocina al aceite de higuera no afecta la producción de biodiesel, ya que se nota en la composición

del biodiesel obtenido, el rendimiento de la reacción y en el poder calorífico.

Tabla 3. Resultados cromatografía de gases del biodiesel.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Esteres metílicos [ME]	Monoglicéridos [MG]	diglicéridos [DG]	triglicéridos [TG]
0%	97,4	0,4	0	0
5%	97,6	0,59	0	0
10%	97,8	0,66	0	0
15%	97,8	0,70	0	0
20%	97,9	0,69	0	0
100%	98,2	0,8	0	0

CONCLUSIONES.

Se obtuvo biodiesel a partir de mezclas de aceite de higuera y aceite usado de cocina por transesterificación. Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que el rendimiento, para mezclas de aceite de higuera con aceite usado de cocina, fueron superiores al 90%, siendo la mezcla de 85% aceite de higuera y 15% aceite usado de cocina la que obtuvo el mayor rendimiento. Además el poder calorífico obtenido para esta mezcla resulta ser la más alta con respecto a las otras mezclas evaluadas. Con este trabajo se puede concluir que es posible integrar el aceite usado de cocina a procesos productivos para la obtención de biodiesel a partir de aceite de higuera, y disminuye los costos del biodiesel generado. Además se logra integrar el aceite usado de cocina a un proceso productivo sin que siga generando impactos en el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Aparicio Izquierdo, Fco. et al. 2008. Ingeniería del Transporte. Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000. Madrid, 486 pp.

[2] Ministerio de minas y energía. (31 de Diciembre de 2004). Ley 939 de 2004. Recuperado el 6 de Julio de 2014, de http://www.minminas.gov.co/minminas/kernel/usuario_externo_normatividad/form_consultar_normas.jsp?parametro=647&site=17

[3] Fedebiocombustibles. (2015). cifras informativas del sector biocombustibles. [http://www.fedebiocombustibles.com/files/cifras%20informativas%20del%20sector%20biocombustibles%20-%20biodiesel\(41\).pdf](http://www.fedebiocombustibles.com/files/cifras%20informativas%20del%20sector%20biocombustibles%20-%20biodiesel(41).pdf).

[4] Syed Ameer Basha, K. Raja Gopal, S. Jebarac. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Septiembre, 2008.

[5] M.C.G.Albuquerque, Y. L. Machado, A.E.B. Torres, D.C.S. Acevedo, C.L. Cavalcante, Properties of biodiesel oils formulated using different biomass sources and their blends. En: Agosto, 2008.

[6] López, A.L.J., González, A.A., Solís, B.J.L., Martínez, V.B.B. y Zamarripa, C.A. 2010. Balance energético en Higuera (Ricinus communis) L. para la producción de biodiesel. Resumen en V Reunión Nacional de Innovación Agrícola Campeche 2010. Memoria, p: 4.

[7] Barajas, C. L. Obtención de biodiesel a partir de la higuera (ricinus communis). 1 er Seminario Internacional de Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. 2004.

[8] Dyna, Año 71, Nro. 153, pp 141 – 150. Biodiesel de higuera, procesos de yuca / etanol y escalas de planta. Medellín, Noviembre de 2007. ISSN 0012 – 7353.

[9] Benavides, A. Y. Biodiesel de aceite de higuera. Una evaluación de su obtención y utilización. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2004.

[10] Alirio Benavides, Pedro Benjumea, Veselina Pashova, El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel, Grupo Combustibles Alternativos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2007.

[11] Iris Adriana Sánchez Medina, Karina Huertas Greco, obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semillas de ricinus communis. (higuera), universidad tecnológica de Pereira, 2012.

[12] Andersen, O. y Weinbach, J.E. (2010). Residual animal fat and fish for biodiesel production. Potentials in Norway. Biomass and Bioenergy, 34(8), 1183-1188.

[13] Arbeláez, A. y Rivera, M. (2007). Diseño conceptual de un proceso para la producción de Biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos. Medellín: Escuela de Ingeniería Universidad EAFIT.

[14] Atabani, A. E.; Silitonga, A. S.; Badruddina, I. A.; Mahliaa, T. M. I.; Masjukia, H. H. y Mekhilefd, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2070–2093.

[15] Awad, S.; Paraschiv, M.; Varuvel, E. G. y Tazerout, M. (2012). Optimization of Biodiesel production

from animal fat residue in wastewater using response surface methodology. Bioresource Technology.

[16] Atadashi, I.M., Aroua, M.K., Abdul Aziz, A. 2010. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 1999-2008.

[17] Bhatti, H. N., Hanif, M. A., Qasim, M., Rehman, A-U. 2008. Biodiesel production from waste tallow. *Fuel*. 87: 2961-2966.

[18] N. L. Panwar, H. Y. Shrirame and B. R. Bamniya. "CO₂ Mitigation Potential from Biodiesel of Castor Seed Oil in Indian Context," *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 12, No. 5, 2010, pp. 579- 582.

[19] N. L. Panwar, Y. H. Shrirame, N. S. Rathore, S. Jindal and A. K. Kurchania, "Performance Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Methyl Ester of Castor Seed Oil," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 2-3, pp. 245-249, 2010.

[20] Aldo Okullo, A. K. Temu, P. Ogwok, J. W. Ntalikwa, "Physico-Chemical Properties of Biodiesel from

Castor Oils" Department of Chemical and Mining Engineering, University of Dar es Salaam Tanzania, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.2, No.1, 2012.

[21] Biodiesel production from raw castor oil Original Research Article, *Energy, Volume 53, 1 May 2013, Pages 58-66* J.M. Dias, , J.M. Araújo, J.F. Costa, M.C.M. Alvim-Ferraz, M.F. Almeida.

[22] López Amézquita. (2012). *Obtención de biodiesel a partir de aceites usados de cocina del club de suboficiales de las fuerzas militares por transesterificación con catálisis ácida-básica*, Bogotá, Fundación Universidad de América.

[23] L. López, J. Bocanegra y D. Malagón-Romero, "Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado", *Ing. Univ.*, vol. 19, no. 1, pp. 155-172, Ene.-Jun., 2015.

[24] J. Herrera y J. Velez, *Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA BIOMASA SÓLIDA RESIDUAL EN COLOMBIA POTENCIALMENTE APROVECHABLE EN PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN TERMOQUÍMICA

Cáceres-Martínez, Louis Edwards¹
Guío-Pérez, Diana Carolina¹
Rincón Prat, Sonia Lucia¹

¹ Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá,
Grupo de investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos - BIOT
loecaceresma@unal.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

La falta de información técnica, clara y coherente sobre las biomásas residuales generadas en Colombia es un problema al que se enfrentan los investigadores e industriales del sector energético en el país. En la presente investigación se realizó un sondeo de las biomásas residuales sólidas generadas en los sectores agrícola, pecuario, forestal y de residuos sólidos orgánicos urbanos. Se identifican los 37 materiales más representativos y potencialmente aprovechables a través de procesos de transformación termoquímicos. La información técnica es consultada de manera exhaustiva en literatura nacional disponible, y se complementa en algunos casos con literatura internacional a fin de llenar vacíos y aclarar inconsistencias en los datos reportados. De esta manera se identifican valores atípicos y se compilan los datos técnicos particulares para cada sector y biomasa residual, posibilitando así el tratamiento eficiente y consistente de los mismos. El objetivo final es recopilar la información necesaria para estimar la cantidad de materia seca generada y su contenido energético, lo cual constituye el primer paso en la estimación del potencial energético teórico correspondiente a biomasa residual en el país y en el estudio de su posible aprovechamiento a través de procesos de transformación termoquímicos.

Palabras claves: Biomasa residual; sectores productivos colombianos; procesos de transformación termoquímica.

INTRODUCCIÓN

La biomasa representa la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, que es utilizable como fuente de energía [1]. La biomasa ha sido la mayor fuente de energía a lo largo de la historia de la humanidad, actualmente se estima que puede contribuir hasta con el 14% del suministro mundial de energía [2]. El sector de generación de energía basado en combustión enfoca cada vez más su atención en dos fuentes de energía que parecían olvidadas, carbón y biomasa. En comparación con los combustibles líquidos y gaseosos, el carbón y la biomasa son menos fáciles de manejar, transportar y convertir a energía eléctrica. Si bien, en relación con biomasa hay algunos inconvenientes referentes a la estabilidad y la viabilidad del procesamiento, dadas sus propiedades altamente variables, altos contenidos de humedad y cenizas y bajo poder calorífico [3], la biomasa está ganando terreno como fuente alternativa de energía, principalmente debido a su carácter renovable y por ser considerada una fuente neutra de carbono [4]. Se deben por lo tanto desarrollar tecnologías de aprovechamiento energético que permitan utilizar de manera eficiente y estable la biomasa teniendo en cuenta la particularidad de sus propiedades.

La biomasa puede ser convertida en múltiples formas de energía utilizando diferentes procesos tecnológicos, que pueden ser termoquímicos o bioquímicos. Estos últimos (fermentación y digestión anaerobia) son utilizados ampliamente en biomasas con contenidos de humedad mayores a 80% [5]. En los procesos de transformación termoquímicos, i.e. la pirólisis, la combustión, la gasificación y la licuefacción, se encuentran implicadas reacciones químicas irreversibles, altas temperaturas, altas tasas de conversión y condiciones variables de oxidación [6]. La pirólisis es la degradación térmica de la biomasa en ausencia de aire, a temperaturas cercanas a 500°C, para transformarla en productos líquidos (gases condensables o alquitranes), sólidos (carbonizado) y gaseosos (gases permanentes), y constituye las reacciones de inicio y de acompañamiento de los procesos de combustión y gasificación [7]. La combustión es utilizada para la producción de calor y generación de electricidad y consiste en la oxidación completa de la biomasa a temperaturas estimadas entre 800°C y 1000°C [5]. La gasificación se fundamenta en la oxidación parcial de la biomasa a temperaturas entre 800 y 900°C y tiene como objetivo la producción de una mezcla de gas combustible denominada gas de síntesis [5]. La licuefacción de biomasa se basa en su hidrogenación indirecta, el producto de esta reacción química es una

mezcla de hidrocarburos que al enfriarse se condensan en un combustible líquido [8].

El adecuado aprovechamiento de un tipo específico de biomasa se consigue únicamente a través de un análisis completo que incluya no solamente aspectos técnicos y económicos, sino también sociales y ambientales [9]. El primer paso en dicho análisis debe contemplar de un lado la tecnología de aprovechamiento y del otro, las características de la materia prima. Respecto a la tecnología, este estudio se enfoca en el proceso de gasificación en lecho fluidizado, dada su flexibilidad, robustez y eficiencia [10]. La gasificación se destaca como la tecnología más atractiva para el aprovechamiento energético del carbón y la biomasa, ya que se caracteriza por mayores temperaturas y mayores tasas de conversión en comparación con los procesos bioquímicos, permitiendo el tratamiento más eficiente de residuos sólidos [11].

En cuanto a materias primas, el presente estudio se concentra en materia residual. Estudios realizados en este tema [12]; [13]; [14]; [15], han identificado los sectores agrícola, pecuario, forestal y de residuos sólidos urbanos como los principales generadores de biomasa residual en Colombia. Bajo esta perspectiva, el presente trabajo identifica las principales biomásas residuales generadas en el país y condensa su información técnica (teniendo como premisa el aprovechamiento térmico) partiendo de la consulta exhaustiva de literatura nacional e internacional. Concentrar esta información tiene un gran valor para la comunidad científica e industrial ya que permite conocer el estado actual de generación, disponibilidad y caracterización técnica de los materiales en cuestión, posibilitando así el desarrollo de proyectos investigativos e impulsando prácticas de generación de valor en los diferentes sectores productivos del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se partió del estado del arte para la clasificación de biomasa y sus residuos, y se procedió con el análisis particular para Colombia, considerando los sectores y subsectores económicos de mayor relevancia para el país.

Clasificación por sectores

Clasificar la biomasa depende en gran medida de los objetivos del estudio y del país en el cuál este se realiza. La clasificación basada en biomasa terrestre y no terrestre parece ser la más general [15]. La metodo-

logía aquí propuesta se enfoca en la biomasa terrestre, la cual a su vez se clasifica en biomasa leñosa y no leñosa [16]. La primera comprende varias subcategorías, incluyendo los bosques naturales, los bosques plantados y todas las actividades relacionadas con los sectores forestal y maderero. La biomasa no leñosa es aquella generada por los sectores agrícola, pecuario (desechos de animales) y de residuos urbanos [15].

Para el caso colombiano, algunos de los sectores que rigen la actividad y desarrollo económico son a la vez productores de biomasa residual. La agricultura, ganadería, pesca y silvicultura aportan en promedio 8.148 miles de millones de pesos por trimestre (a precios constantes y cifras desestacionalizadas para 2015) [17]. Estos cuatro sectores generadores de biomasa son por lo tanto considerados para el estudio: el sector agrícola (incluyendo cultivos transitorios y permanentes), el sector pecuario, el sector forestal y el sector de residuos sólidos urbanos (RSOU). Dentro del sector forestal se identifican seis especies forestales con gran potencial para plantaciones forestales comerciales y/o dendroenergéticas en el país [14] [18].

Tres estudios previos estiman el potencial energético a partir de biomasa residual en Colombia:

- Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia [13],
- Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia [12] y
- Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia [15].

Estos estudios ayudan a identificar además de los 4 sectores ya mencionados, 7 sub-sectores y 19 cultivos y procesos generadores de biomasa residual en Colombia (sintetizados en la Fig.1). A partir de esta clasificación es posible reconocer 37 biomazas sólidas residuales principales, que por sus altas cantidades de producción y por su inadecuada disposición final (a causa de limitadas alternativas tecnológicas de transformación), suscitan graves problemas de contaminación ambiental y se vislumbran como materias primas potencialmente aprovechables a través de procesos de transformación energéticos (Fig.2).

Figura 1. Cultivos y procesos generadores de biomasa residual en Colombia, clasificados por sectores, sub-sectores

Figura 2. Biomásas sólidas residuales, identificadas como aprovechables energéticamente en Colombia.

Recolección de datos técnicos

Una vez se establece el grupo de biomásas residuales de interés, se consulta datos técnicos reportados en la literatura, dando énfasis a los reportes de entidades sectoriales y gubernamentales nacionales. Para los casos en los que la información resultó ser insuficiente o inconsistente, se complementó con información disponible en literatura internacional. Los datos de las diversas fuentes se contrastan, se realiza un análisis de valores atípicos y se compilan con fines de comparación. Dado que el presente estudio se concentra en el análisis de disponibilidad y potencial de aprovechamiento energético, las variables reportadas dependen del sector analizado y se enfocan en formar la base técnica para estimar la cantidad materia generada y el potencial energético por biomasa residual. Los datos técnicos verificados y comparados se presentan en la sección de resultados. Debido a la extensión limitada del presente artículo, no es posible presentar el listado completo de fuentes consultadas. Se presenta sin embargo el número de referencias consultadas para la estimación de cada parámetro.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 1 muestra: el factor de residuo (indicador de la fracción en peso generada por producto principal producido), el contenido de humedad y el poder calorífico en base seca de las biomásas residuales asociadas al sector agrícola. Se identifica una alta humedad en los residuos de pulpa de café, tamo de arroz y en los residuos de la industria bananera y platanera. Rangos amplios en los factores de residuo se asocia con los residuos de alta dispersión de los cultivos de arroz (tamo) y maíz (rastrojo).

Relativo al sector pecuario, la Tabla 2 muestra: la tasa de estiércol producido por cabeza avícola de engorde, el contenido de humedad de la pollinaza y su poder calorífico inferior en base seca. Se considera solamente la biomasa residual del sector avícola de engorde ya que posee el contenido de humedad adecuado para su aprovechamiento en procesos termoquímicos (18-48%).

La información bajo un marco general del sector forestal es presentada en la Tabla 3. Allí se visualiza:

el factor de residuo por actividad o producto forestal (i.e., la cantidad de residuos producidos en función de la cantidad de madera como producto principal generado) y el rango de los poderes caloríficos de maderas comúnmente utilizadas en los procesos industriales y silviculturales. La Tabla 4 presenta la información técnica de las especies forestales potenciales identificadas para plantaciones dendroenergéticas en Colombia [14]. Allí se incluye el porcentaje plantado estimado de cada especie para el año 2015 sobre un total reportado de 398.070 hectáreas [19]. Además, se presenta su Incremento Medio Anual, su densidad y su turno en años empleado para su explotación, aspectos claves que permiten conocer la cantidad de madera generada por especie en relación a la superficie plantada por año.

La caracterización de los residuos sólidos residenciales de la ciudad de Bogotá D.C para el año 2011 es presentada en la Tabla 5 [20]. La capital del país [21] es contemplada como el nicho más adecuado para categorizar las basuras domiciliarias del país dado el tamaño de su población y la multiculturalidad que allí habita. Así, los datos de caracterización y clasificación de los residuos presentados para Bogotá pueden ser utilizados a manera de aproximación en los demás departamentos del país dada la falta de información específica. La Tabla 6 muestra los poderes caloríficos inferiores de los residuos de alimentos, podas y otros residuos orgánicos en base húmeda. El poder calorífico de la mezcla de residuos de papel, cartón, plástico, textiles y maderas no se encontró en la literatura. Para estimarlo, se promedió el poder calorífico inferior de los residuos no mezclados.

Tabla 1. Datos técnicos para el sector agrícola

CULTIVO	TIPO DE RESIDUO	FACTOR DE RESIDUO [%]			CONTENIDO DE HUMEDAD [%]			PODER CALORÍFICO INFERIOR EN BASE SECA [kJ/kg]		
		mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref
Palma de aceite	Cuesco	5	9	5	7	15	3	16483	20020	3
	Fibra	11	15	4	31	42	3	13935	17894	4
	Raquis	17,7	50	5	50	65	3	16824	18502	2
Caña de azúcar	Hojas - Cogollo	5	47	7	25	75	4	14800	21429	5
	Bagazo	10	40	6	41	52	4	15400	18656	3
Caña panelera	Bagazo	28	50,6	2	41	52	2	16240	18656	2
	Hojas - Cogollo	14,4	46	2	25	75	2	14800	21429	3
Café	Pulpa	210	271	4	60	80	3	15880	17832	2
	Cisco	16	23	6	7	15	4	12380	18548	6
	Tallos	302	333	2	14	26	2	18343	19750	2
Maíz	Rastrojo	93	433	6	15	15	3	12455	16520	5
	Tusa	18	27,3	7	8	27	3	14184	21876	6
	Capacho	20	30	5	5	11	3	12000	17690	3

CULTIVO	TIPO DE RESIDUO	FACTOR DE RESIDUO [%]			CONTENIDO DE HUMEDAD [%]			PODER CALORÍFICO INFERIOR EN BASE SECA [kJ/kg]		
		mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref
Arroz	Tamo	42	396	6	73	88	1	13000	15340	5
	Cascarilla	15	36	8	4	14	5	12900	17818	6
Banano & exp.	Raquis	100	108	2	94	94	2	7569	15530	2
	Vástago	300	651	3	92	94	3	8502	16130	3
	Rechazo	15	67	4	79	85	2	10410	15748	3
Plátano & exp.	Raquis	100	108	2	94	94	2	7565	15530	2
	Vástago	300	651	2	92	94	2	8502	16130	2
	Rechazo	15	67	3	79	85	1	10410	15748	2

Tabla 2. Datos técnicos para el sector pecuario

SUBSECTOR	RESIDUO	TASA DE PROD. DE ESTIERCOL POR CABEZA [kg/cabeza·año]			CONTENIDO DE HUMEDAD [%]			PODER CALORÍFICO INFERIOR EN BASE SECA [kJ/kg]		
		mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref
Avícola - Engorde	Pollinaza	13	30	4	18	48	7	14790	17230	3

Tabla 3. Datos técnicos para el sector forestal

SUBSECTOR	ACTIVIDADES Y PRODUCTOS	FACTOR DE RESIDUO [%]			PODER CALORÍFICO INFERIOR EN BASE SECA [kJ/kg]		
		mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref
Procesos industriales	Pulpa y tableros de madera	30	55	3	16791,00	20768,00	1
	Madera aserrada y construcción	30	60	3	16791,00	20768,00	1
Silvicultura	Bosques naturales	23	60	3	16791,00	20768,00	1
	Bosques plantados - Reforestación	30	100	3	16791,00	20768,00	1

Tabla 4. Datos técnicos de las especies forestales potenciales para plantaciones en Colombia

NOMBRE CIENTÍFICO	% ESPECIE 2015	TURNO [años]			INCREMENTO MEDIO ANUAL [m³/ha·año]			DENSIDAD [kg/m³]		
		mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref	mín	máx	N° Ref
Eucalyptus grandis	8	7	10	4	20	40	4	400	550	3
Acacia mangium	9	8	12	4	24	43	4	350	690	3
Gmelina arborea	6	10	14	4	10	37	3	380	640	4
Pinus patula	23	15	25	5	10	27	5	430	480	3
Pinus maximinoi	3	15	25	3	10	24	2	460	520	2
Tectona grandis	27	18	28	4	7	25	4	530	800	2

Tabla 5. caracterización de los residuo sólidos residenciales de Bogotá D.C para 2011 [20]

N°	CATEGORIA	% CATEGORÍA
1	Alimentos	60.56%
2	Residuos de jardinería	0,87%
3	Residuos de papel y cartón	7,10%
4	Residuos de plástico	10,46%
5	Residuos de caucho y cuero	0,42%
6	Residuos textiles	1,89%
7	Residuos de madera	0,32%
8	Residuos inorgánicos	18.38%

Tabla 6. Datos técnicos para el sector de Residuos Sólidos Urbanos

SUB-CATEGORIA	PODER CALORÍFICO INFERIOR EN BASE HÚMEDA [kJ/kg]		
	mín	máx	N° Ref
Residuos de alimentos	700	3900	2
Podas	1627	8457	2
Promedio otros orgánicos	9460	17917	3

Se destacan en el sector agrícola aquellas biomasa-
sas residuales que se generan en mayor proporción
que el producto principal del cultivo, i.e aquellas con
un factor de residuo mayor a 100%: la pulpa y los tallos
de café, el rastrojo de maíz, el tamo de arroz, el raquis y
el vástago del banano y el plátano. Estos residuos por
lo general son los que se encuentran más dispersos en
los campos de cultivo lo cual dificulta su recolección
y transporte limitando su posible utilización en proce-
sos de aprovechamiento energético. Altos contenidos
de humedad asociados a las biomasa-
sas residuales de los cultivos de banano y plátano, al tamo de arroz y a
la pulpa de café desvirtuan estas biomasa-
sas con miras a su aprovechamiento en procesos termoquímicos.
Se encuentran poderes caloríficos en base seca entre
12.000 y 22000 kJ/kg. Poca información se encuentra
en la literatura relativa a las biomasa-
sas de los cultivos del banano y el plátano.

Procesos de secado deberán efectuarse en la polli-
naza con el objetivo de disminuir su humedad a valores
menores al 15% con miras a su utilización en procesos
termoquímicos. No se encuentran valores particulares
de poderes caloríficos inferiores en base seca de las
especies forestales bajo análisis. Se muestra un rango
de valores reportados en la literatura de maderas co-
mercialmente utilizadas. El porcentaje plantado en Co-
lombia para el año 2015, el turno, el Incremento Medio
Anual y la densidad base o al 12% de humedad se pre-
sentan para cada especie forestal. Bajos turnos y al-
tos IMAs y densidades favorecen emplear las especies
forestales en cultivos dendroenergéticos con miras a

su aprovechamiento en procesos termoquímicos. Por
último, los bajos poderes caloríficos en base húmeda
asociados los Residuos Sólidos Urbanos limitan su uti-
lización a través de procesos termoquímicos.

CONCLUSIONES

Año a año se comprende la importancia de explo-
rar alternativas tecnológicas que permitan suplir los
requerimientos energéticos de la sociedad colombia-
na y mitigar la dependencia de los combustibles fósi-
les y los recursos hídricos. La biomasa representa el
combustible alternativo más ampliamente disponible
a nivel mundial y susceptible a ser aprovechado por
medio de tecnologías ya establecidas y funcionales.
Los procesos termoquímicos en especial la gasifica-
ción permite el tratamiento eficiente de la biomasa de-
bido a temperaturas y tasas de conversión mayores,
en comparación con los procesos bioquímicos. Cono-
cer los principales sectores y actividades generadoras
de biomasa residual en Colombia resulta fundamental
a la hora de impulsar su aprovechamiento energético.
El presente documento identifica los sectores agrícola,
pecuario, forestal y de residuos sólidos urbanos, como
los más relevantes en cuanto a producción de bioma-
sa residual y compila la información técnica de las 37
principales biomasa-
sas residuales más importantes ge-
neradas en el país. Se reportan datos producto de la
compilación de información desde diversas fuentes,
lo cual amplía la confiabilidad de los mismos. Índices
y variables claves para la estimación de potenciales
energéticos fueron seleccionados y reportados. La
presente investigación proporciona por tanto las bases
cuantitativas para conocer el estado actual de las bioma-
sas residuales generadas en Colombia y constituye
una base importante para la estimación del potencial
energético de las mismas en miras de su aprovecha-
miento en procesos termoquímicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Real Academia Española - RAE, "Diccionario de la lengua española. RAE.," 2016.

[2] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresour. Technol*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, 2002.

[3] A. Demirbas, "Combustion characteristics of different biomass fuels," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 219–230, 2004.

- [4] A. Cuellar, "Plant Power : The Cost of Using Biomass for Power Generation and Potential for Decreased Greenhouse Gas Emissions," Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [5] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies," *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 47–54, 2002.
- [6] J. L. Miguez, "Procesos Termoquímicos a Partir De La Fitomasa Residual," 2004.
- [7] A. Gómez, W. Klose, and S. Rincón, *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite*. 2008.
- [8] J. Moragues and A. Rapallini, "Energía de la biomasa," *Energías Renov.*, pp. 18–21, 2003.
- [9] Y.D. Urrego Pinto and M.H. Romero Moreno, "Propuesta de gestión para reducción de barreras en la generación eléctrica, a partir de gasificación de residuos de biomasa forestal, para Zonas No Interconectadas en Colombia (caso Necoclí, Antioquia)," Pontificia Universidad Javeriana, 2015.
- [10] P. Basu, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, vol. 53, no. 9. 2006.
- [11] U. Arena, "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 4, pp. 625–639, 2012.
- [12] H. Escalante Hernández, J. Orduz Prada, H. J. Zapata Lesmes, M. C. Cardona Ruiz, and M. Duarte Ortega, *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*, vol. 53, no. 9. 2011.
- [13] AENE Consultoria S.A, "Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en colombia," 2003.
- [14] J.F. Pérez Bayer and L.F. Osorio Vélez, *Biomasa forestal como alternativa energética. Análisis silvicultural, técnico y financiero de proyectos*. 2014.
- [15] M.A. González-Salazar, M. Morini, M. Pinelli, P.R. Spina, M. Venturini, M. Finkenrath, and W. R. Poganietz, "Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia," *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 781–796, 2014.
- [16] F. Rosillo Calle, P. de Groot, S. L. Hemstock, and J. Woods, *The Biomass assessment handbook*, vol. 1. EARTHSCAN, 2007.
- [17] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, "Producto Interno Bruto por ramas de actividad económica a precios constantes, series desestacionalizadas - III trimestre de 2015," 2015.
- [18] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural and Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, "Cadena forestal - Madera," 2014.
- [19] M.L. Castañeda Farfán, "Cadena forestal, madera, tableros, muebles y otros productos de madera," 2015.
- [20] Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos, "Caracterización De Los Residuos Sólidos Residenciales Generados En La Ciudad De Bogotá D.C. 2011," p. 69, 2011.
- [21] DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, *Proyecciones nacionales y departamentales de poblacion 2005-2020*. 2009.

POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO Y TÉCNICO DE BIOMASA RESIDUAL DISPONIBLE EN COLOMBIA PARA APROVECHAMIENTO EN PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN TERMOQUÍMICA

Cáceres Martínez, Louis Edwards¹
Guío-Pérez, Diana Carolina¹
Rincón Prat, Sonia Lucia¹

¹ Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá,
Grupo de investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos - BIOT
loecaceresma@unal.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

El aprovechamiento energético de biomasa residual es una estrategia que contribuirá a reducir las emisiones de CO₂ a nivel mundial. En Colombia, esta práctica se visualiza como una alternativa de gran potencial para implementar proyectos energéticos sustentables en las Zonas No Interconectadas (ZNI). El presente trabajo se enfoca en el primer paso necesario para proponer tecnologías eficientes de aprovechamiento de biomasa residual, la valoración de los potenciales energéticos por el modelo térmico. Mediante un análisis de la situación particular de los sectores productivos relevantes, y una recopilación concienzuda de información, se lograron estimar potenciales energéticos teórico y técnico de 719.3 PJ/año y 77.3 PJ/año respectivamente. Se identificaron 12 biomasa residual disponibles y potencialmente aprovechables en procesos de transformación termoquímica y se resaltaron los departamentos, municipios y regiones más representativas para cada una de dichas biomasa. Como próximo paso en la investigación, se propone la evaluación física, fluidodinámica y termoquímica de estas biomasa. Adicionalmente, deberán plantearse los fundamentos de los análisis económico y ambiental a fin de garantizar su aprovechamiento sostenible en regiones específicas del país

Palabras claves: Biomasa residual; potencial energético; procesos termoquímicos; Zonas No Interconectadas.

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía es uno de los principales indicadores de desarrollo y crecimiento de un país, y al mismo tiempo la causa principal de la producción excesiva de CO₂ [1]. La seguridad de abastecimiento energético es una prioridad para los países en desarrollo como Colombia, poseedores de una población y una demanda energética crecientes. Las estrategias de corto plazo para reducir las emisiones de CO₂ deben por tanto considerar la tasa de consumo energético actual y las proyecciones a futuro [2].

La biomasa ha sido la mayor fuente de energía para la humanidad a lo largo de su historia y puede contribuir actualmente con cerca del 14% del suministro mundial de energía [3]. El sector de generación de energía enfoca cada vez más su atención en la biomasa, la cual, a pesar de presentar inconvenientes referentes a su estabilidad y la viabilidad de procesamiento, dadas sus propiedades altamente variables, altos contenidos de humedad y cenizas y bajo poder calorífico [4], está ganando terreno como fuente alternativa de energía, debido a su carácter renovable y por ser una fuente neutra de carbono [5]. Se están desarrollando entonces tecnologías de aprovechamiento energético que permiten utilizar de manera eficiente la biomasa con la particularidad de sus propiedades.

La biomasa puede ser convertida en múltiples formas de energía utilizando diferentes procesos, principalmente los termoquímicos y los bioquímicos. Estos últimos (fermentación y digestión anaerobia) son utilizados en biomasa con contenidos de humedad superiores a 80% [6]. En los procesos de transformación termoquímicos, i.e. la pirólisis, la combustión, la gasificación y la licuefacción, se observan reacciones químicas irreversibles, altas temperaturas, altas tasas de conversión y condiciones de oxidación [7]. La pirólisis es la degradación térmica de la biomasa, en ausencia de oxígeno, a temperaturas cercanas a 500°C, a productos líquidos, sólidos y gaseosos con algún valor energético [8]. La combustión es utilizada para la producción de calor y la generación de electricidad y consiste en la oxidación completa de la biomasa a temperaturas estimadas entre 800°C y 1000°C [6]. La gasificación se fundamenta en la oxidación parcial de la biomasa a temperaturas entre 800°C y 900°C y tiene como objetivo la producción de una mezcla de gas combustible denominada gas de síntesis [6].

En Colombia, la falta de cobertura del servicio de energía eléctrica es un problema que afecta a las poblaciones que habitan en las ZNI. Estas comunidades

sólo reciben energía eléctrica ocasionalmente a través de plantas de generación Diesel [9], poseen altos índices de pobreza y baja capacidad técnica. Dichas zonas, sin embargo, poseen por lo general grandes cantidades de recursos de biomasa, en especial forestal y agrícola, las cuales pueden ser aprovechadas para la generación de energía, siempre que se cuente con la tecnología adecuada [9].

El adecuado aprovechamiento de un tipo específico de biomasa se consigue únicamente a través de un análisis completo que incluya no solamente aspectos técnicos, sino también económicos, ambientales y sociales [10]. El primer paso en dicho análisis debe contemplar de un lado la tecnología de aprovechamiento y del otro, las características de la materia prima. Este estudio busca estimar el potencial energético teórico y técnico de biomasa residual disponible en Colombia con miras en promover proyectos de aprovechamiento energético a través de la pirólisis, la combustión y la gasificación de biomasa residual en ZNI.

MATERIALES Y MÉTODOS

Algunos de los sectores que rigen la actividad y desarrollo económico en Colombia son a la vez productores de grandes cantidades de biomasa residual. La agricultura, ganadería, pesca y silvicultura aportan en promedio al país 8.148 miles de millones de pesos por trimestre [11]. El presente estudio contempla las biomasa residual generadas por el sector agrícola, incluyendo los cultivos transitorios de arroz y maíz y los cultivos permanentes de palma de aceite, caña de azúcar, caña panelera, café, banano y plátano; el sector pecuario (avícola de engorde); el sector forestal, haciendo énfasis en las especies potencialmente aprovechables en plantaciones comerciales y dendroenergéticas (acacia mangium, tectona grandis, pinus patula, pinus maximinoi, eucalyptus grandis y gmelina arborea) [12] [13]; y el sector de residuos sólidos orgánicos urbanos, i.e. los residuos de alimentos, los residuos de podas y adecuación de zonas verdes y otros residuos orgánicos derivados de procesos de reciclaje.

La formulación matemática asociada al cálculo del potencial energético teórico y técnico se fundamenta en los modelos térmicos empleados por Escalante [14] y González [15]. El potencial energético teórico se entenderá como el máximo contenido energético posible a obtener de la combustión de toda la biomasa seca generada. El potencial energético técnico describe la energía máxima que se puede obtener de la combustión de la biomasa realmente disponible para este

fin [16]. Cada sector generador de biomasa residual contempla diferentes variables que serán enunciadas a continuación y que son específicas para cada una de las biomazas residuales bajo estudio.

El potencial energético teórico ($P.E_{ag, \text{teórico}}$) asociado al sector agrícola relaciona la superficie sembrada S_i , el rendimiento R_i , el factor de residuo (peso de residuo generado por producto principal) F_{ij} , el contenido de humedad M_{ij} , y el poder calorífico inferior del residuo en base seca LHV_{ij} (Ecuación 1). El potencial energético técnico ($P.E_{ag, \text{técnico}}$) será calculado multiplicando el potencial energético teórico por el factor de disponibilidad A_{ij} (Ecuación 2), i.e., la cantidad de residuo, en peso, disponible en el país para su aprovechamiento con tecnologías alternativas. El potencial energético teórico del sector pecuario ($P.E_{pe, \text{teórico}}$) vincula la cantidad de cabezas de aves de engorde H , la tasa de producción de estiércol por cabeza E , el contenido de humedad de la pollinaza M_m , y su poder calorífico inferior en base seca LHV_m (Ecuación 3). De igual forma, el potencial energético técnico pecuario ($P.E_{pe, \text{técnico}}$) se obtendrá multiplicando el potencial teórico por el factor de disponibilidad A_m identificado para la pollinaza (Ecuación 4).

El potencial energético teórico del sector forestal ($P.E_{f, \text{teórico}}$) relaciona la superficie plantada Y_n , el Incremento Medio Anual de la especie IMA_n , la densidad al 12% de humedad para el turno biológico de la especie ρ_n , el factor de residuo asociado a la actividad generadora de biomasa (i.e., si la madera es utilizada en la elaboración de tableros, como madera pulpa, etc) C_n ; y el poder calorífico inferior en base seca LHV_n (Ecuación 5). Multiplicar dicho resultado por el factor de disponibilidad A_n asociado a cada especie forestal permite obtener el potencial energético técnico para este sector ($P.E_{f, \text{técnico}}$) (Ecuación 6).

El potencial energético teórico del sector de residuos urbanos, RSOU ($P.E_{RSOU, \text{teórico}}$), asocia la cantidad de residuo sólido orgánico urbano P_x , con su poder calorífico inferior en base húmeda LHV_x (Ecuación 7). De manera análoga, el potencial energético técnico ($P.E_{RSOU, \text{técnico}}$) es calculado multiplicando ese valor por el factor de disponibilidad de cada grupo de residuos A_x (Ecuación 8).

Por último, el potencial energético teórico total (Ecuación 9) y el potencial energético técnico total (Ecuación 10) se estiman con la suma de potenciales energéticos calculados para los sectores bajo estudio.

$$P.E_{Ag, \text{teórico}} = \sum_i \sum_j S_i R_i F_{ij} (1 - M_{ij}) LHV_{ij} \quad (1)$$

$$P.E_{Ag, \text{técnico}} = \sum_i \sum_j S_i R_i F_{ij} (1 - M_{ij}) LHV_{ij} * A_{ij} \quad (2)$$

$$P.E_{Pe, \text{teórico}} = H.E(1 - M_m) LHV_m \quad (3)$$

$$P.E_{Pe, \text{técnico}} = H.E(1 - M_m) LHV_m * A_m \quad (4)$$

$$P.E_{f, \text{teórico}} = \sum_n Y_n IMA_n \rho_n C_n LHV_n \quad (5)$$

$$P.E_{f, \text{técnico}} = \sum_n Y_n IMA_n \rho_n C_n LHV_n * A_n \quad (6)$$

$$P.E_{RSOU, \text{teórico}} = \sum_x P_x LHV_x \quad (7)$$

$$P.E_{RSOU, \text{técnico}} = \sum_x P_x LHV_x * A_x \quad (8)$$

$$P.E_{total, \text{teórico}} = \sum_k P.E_{k, \text{teórico}} \quad (9)$$

$$P.E_{total, \text{técnico}} = \sum_k P.E_{k, \text{técnico}} \quad (10)$$

RESULTADOS Y ANALISIS

Las estadísticas y los datos técnicos son obtenidos de literatura disponible. Se da prioridad a los estudios nacionales y a las instituciones gubernamentales relacionadas con los sectores bajo estudio. Los valores de superficies sembradas y rendimientos de cultivos son tomados del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural para el año 2013 [17]. El censo avícola realizado por el Instituto Colombiano Agropecuario proporciona la información referente al sector pecuario [18]. Las superficies plantadas, los estudios de estado actual y de potencial de las plantaciones forestales con fines comerciales son suministrados por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [19]. Por último, la Superintendencia de servicios públicos domiciliarios y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos de la ciudad de Bogotá proveen la información relativa a las cantidades y sistemas de disposición de los RSOU en Colombia [20] y la clasificación de los residuos sólidos residenciales de la ciudad de Bogotá, respectivamente [21]. El P.E.total, teórico es calculado utilizando la metodología descrita arriba y se estima en 719,3 PJ/año. El sector agrícola aporta el 77% y se consolida como el sector con mayor potencial. Los sectores forestal con 9,7%, de RSOU con 7,3% y pecuario con el 5,3% proporcionan la fracción restante. Los resultados obtenidos en el presente estudio son comparados con reportados por AENE [22], Escalante [14] y González [15] en la Fig. 1.

El P.E.total, técnico es calculado con base en los factores de disponibilidad asociados a cada una de las biomasa residual bajo estudio y son resumidos en la Tabla 1. Estos factores buscan estimar la proporción entre la cantidad de residuo actualmente utilizada o transformada por el sector productivo y la cantidad disponible para ser aprovechada mediante procesos alternativos. La estimación de estos factores requiere de un análisis particular del subsector correspondiente. Se encontró que la mayoría de los residuos contemplados encuentran aplicación como alimento para animales, material para compostaje y combustión directa en calderas. El análisis completo por sectores puede encontrarse en [23].

Utilizando los factores de disponibilidad arriba listados, se estima un potencial energético técnico para biomasa residual en Colombia de 77.3 PJ/año, 10.75% del potencial energético teórico calculado, distribuido en un 60% por los residuos agrícolas, 15% a la pollinaza y un 25% a los residuos forestales. Este resultado es comparable, como se observa en la Fig. 2, con estudios equivalentes. Dentro de los residuos estudiados

se destacan en particular, el cogollo de la caña de azúcar con un 42.19% y la pollinaza del sector avícola con un 14.68%. La Tabla 2 presenta la cantidad de materia seca estimada de cada biomasa residual disponible y muestra el potencial energético técnico (en PJ/año) y los departamentos y municipios más representativos de Colombia del país para cada una. Para el sector forestal se destacan los departamentos de Meta, Vichada y Antioquia con más de 2.5 millones de hectáreas potencialmente aptas para el desarrollo de actividades forestales [19]. Se estiman 4 millones de toneladas de biomasa seca disponibles en Colombia para su aprovechamiento energético a través de procesos de transformación termoquímicos.

Figura 1. Comparación del P.E. teórico calculado con otros estudios equivalentes en Colombia

Tabla 1. Factores de disponibilidad de las biomasa residual generadas en Colombia

PRODUC-TO PRINCIPAL	BIOMASA RESIDUAL	USOS ACTUALES COMUNES			OTROS USOS ALTERNOS	FAC-TOR DE DISP. (%)
		ALIMENTO ANIMALES	COMPOST Y CAMPO	CALOR - COMBUS-TIÓN		
Palma de aceite	Cuesco		x	x	Venta y vías	57
	Fibra		x	x		12
	Raquis		x	x	Cama para cerdos	83
Caña de azúcar	Hojas - cogollo	x	x			20
	Bagazo			x	Papel	0
Caña panelera	Bagazo			x		0
	Hojas - cogollo	x	x			0
Café	Pulpa	x	x		Lombricul-tura	0
	Cisco			x		25
	Tallos		x	x	Secado de granos	0
Maíz	Rastrojo	x	x			0
	Tusa	x				0
	Capacho	x				0

PRODUCTO PRINCIPAL	BIOMASA RESIDUAL	USOS ACTUALES COMUNES			OTROS USOS ALTERNOS	FACTOR DE DISP. (%)
		ALIMENTO ANIMALES	COMPOST Y CAMPO	CALOR - COMBUSTIÓN		
Arroz	Tamo		x			0
	Cascarilla		x		Material de cama	44
Banano y banano de exportación	Raquis	x	x		Artesanías y fibras	0
	Vástago	x	x		Carbón activado	0
	Rechazo	x	x		Alcohol anhidro	0
Plátano y plátano de exportación	Raquis	x	x		Artesanías y fibras	0
	Vástago	x	x			0
	Rechazo	x	x			0
Avícola (eng.)	Pollinaza		x		Reutilizada	30
Resid. sólidos orgánicos urbanos	Alimentos	x				0
	Podas	x				0
	Otros orgánicos				Reciclaje	0
Forestal	<i>Tectona grandis</i>	Madera redonda, chapas, construcción, muebles				0
	<i>Eucalyptus grandis</i>	Construcción, pisos, muebles, carpintería, tableros, leña, carbón				50
	<i>Acacia mangium</i>	Carpintería, construcción, muebles, tableros, leña, carbón, pulpa				50
	<i>Gmelina arborea</i>	Construcción, muebles, ebanistería, pulpa, chapas, tableros				50
	<i>Pinus patula</i>	Construcción, pulpa, chapas, ebanistería, tableros, leña, carbón				50
	<i>Pinus maximinoi</i>	Construcción, ebanistería, tableros, embalaje				50

BIOMASA RESIDUAL	PRODUCTO PRINCIPAL	CANTIDAD DISPONIBLE [ton/año]	POTENCIAL ENERGÉTICO TÉCNICO [PJ/año]	DEPARTAMENTO REPRESENTATIVO	MUNICIPIO REPRESENTATIVO
Cogollo	Caña de azúcar	1.521.635,7	32,61	Valle del Cauca	Palmira
Pollinaza	Avícola (engorde)	658.810,9	11,35	Santander	Piedecuesta
Cascarilla	Arroz	387.786,5	6,91	Tolima	Saldaña
<i>Pinus patula</i>	Forestal	326.305,9	6,25	Región Orinoquía, eje cafetero y suroccidental	
<i>Acacia mangium</i>	Forestal	318.889,9	5,98	Región Caribe y alto Magdalena	
Raquis	Palma de aceite	251.187,7	4,65	Meta	San Carlos de Guaroa
<i>Eucalyptus grandis</i>	Forestal	192.665,9	3,68	Región Orinoquía, eje cafetero, suroccidental, Caribe y alto Magdalena	
<i>Gmelina arborea</i>	Forestal	155.533,9	2,94	Región Caribe y alto Magdalena	
Cuesco	Palma de aceite	57.753,8	1,16	Meta	San Carlos de Guaroa
<i>Pinus maximinoi</i>	Forestal	44.711,2	0,85	Región Orinoquía, eje cafetero y suroccidental	
Cisco	Café	34.963,5	0,65	Huila	Pitalito
Fibra	Palma de aceite	15.034,9	0,27	Meta	San Carlos de Guaroa
Total Colombia		3.965.279,8	77,30	-	-

CONCLUSIONES

La presente investigación presenta una metodología sencilla, confiable y reproducible para calcular el potencial energético teórico bajo el modelo térmico, de las biomasas residuales sólidas disponibles en Colombia. Se estimó un potencial energético teórico de 719.3 PJ/año y un potencial energético técnico de 77.3 PJ/año, resultados comparables con estudios equivalentes realizados en el país. Asociado a este último resultado, se identifican 12 biomasas residuales disponibles y potencialmente aprovechables por medio de procesos de transformación termoquímicos, estos son: el cogollo de la caña de azúcar, la pollinaza, la cascarilla de arroz, la cascarilla de café, el raquis, la fibra y el cuesco de la palma de aceite y las especies forestales de acacia mangium, pinus patula, pinus maximinoi, gmelina arborea y eucalyptus grandis. Se destacan los departamentos y municipios más representativos para cada una de las biomasas residuales identificadas. Para las biomasas asociadas al sector forestal se identifican además, las regiones potenciales de crecimiento de las especies contempladas. Los procesos de aprovechamiento termoquímico, en especial la gasificación,

Figura 2. Comparación del P.E. técnico calculado con otros estudios equivalentes en Colombia

son alternativas de gran potencial para la explotación del potencial energético técnico calculado de biomasa residual. La implementación de tal tecnología, requerirá políticas económicas, sociales y ambientales que garanticen la sustentabilidad del proyecto energético y de su posible uso en ZNI. Futuros cambios en la situación de cada sector productivo pueden ser incorporados a la metodología acá presentada, con el propósito de recalculer los correspondientes potenciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] National Council for Science and the Environment, "Energy for a Sustainable and secure Future: A report of the Sixth National Conference on Science, Policy and the Environment," in *National Council for Science and the Environment*, 2006, pp. 1–19.

[2] D. C. Guío-Pérez, "Evaluación química y fluidodinámica de combustibles sólidos no convencionales para su aprovechamiento térmico en un reactor de lecho fluidizado circulante (dissertación)," 2013.

[3] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, 2002.

[4] A. Demirbas, "Combustion characteristics of different biomass fuels," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 219–230, 2004.

[5] A. Cuellar, "Plant Power : The Cost of Using Biomass for Power Generation and Potential for Decreased Greenhouse Gas Emissions," Massachusetts Institute of Technology, 2012.

[6] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies," *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 47–54, 2002.

[7] J. L. Miguez, "Procesos Termoquímicos a Partir De La Fitomasa Residual," 2004.

[8] A. Gómez, W. Klose, and S. Rincón, *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite*. 2008.

[9] UPME, "Resumen ejecutivo. Plan indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2013 - 2017," Colombia, 2014.

[10] Y. D. Urrego Pinto and M. H. Romero Moreno, "Propuesta de gestión para reducción de barreras en la generación eléctrica, a partir de gasificación de residuos de biomasa forestal, para Zonas No Interconectadas en Colombia (caso Necoclí, Antioquia)," Pontificia Universidad Javeriana, 2015.

[11] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, "Producto Interno Bruto por ramas de actividad económica a precios constantes, series desestacionalizadas - III trimestre de 2015," 2015.

[12] J. F. Pérez Bayer and L. F. Osorio Vélez, *Biomasa forestal como alternativa energética. Análisis silvicultural, técnico y financiero de proyectos*. 2014.

[13] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural and Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, "Cadena forestal - Madera," 2014.

[14] H. Escalante Hernández, J. Orduz Prada, H. J. Zapata Lesmes, M. C. Cardona Ruiz, and M. Duarte Ortega, *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*, vol. 53, no. 9. 2011.

[15] M. A. González-Salazar, M. Morini, M. Pinelli, P. R. Spina, M. Venturini, M. Finkenrath, and W. R. Pogonietz, "Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia," *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 781–796, 2014.

[16] J. Müller, "Analysis of biomass residues potential for electrical energy generation in Albania," no. May 2016, 2010.

[17] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Agronet," 2013. [Online]. Available: <http://www.agronet.gov.co/Paginas/estadisticas.aspx>. [Accessed: 04-May-2016].

[18] Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, "Censo Pecuário Nacional - 2015," 2015.

[19] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria and Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, *Zonificación para plantaciones forestales con fines comerciales – Colombia escala 1:100.000 Memoria técnica*. Bogotá D.C, 2014.

[20] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, *Disposición Final de Residuos Sólidos. Informe Nacional*. 2014.

[21] Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos, "Caracterización De Los Residuos Sólidos Residenciales Generados En La Ciudad De Bogotá D.C. 2011," p. 69, 2011.

[22] AENE Consultoria S.A, "Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en colombia," 2003.

[23] D. C. Guío-Pérez, S. L. Rincón-Pratt, L. E. Cáceres-Martínez, and D. A. Tibocha-Guzmán, "Suitability analysis of residual biomass in Colombia for gasification in fluidized bed - theoretical and technical energy potential," *Eur. Biomass Conf. Exhib. -EUBCE*, p. 9, 2016.

PELLETS DE BIOMASA: UNA ALTERNATIVA DE ENERGÍA TOTALMENTE VIABLE

Rodríguez Riaño, Luisa Fernanda¹
Camargo Vargas, Gabriel²

¹ Universidad Libre de Colombia, Acuaingeniería

² Universidad Libre de Colombia, Docente, Acuaingeniería
luisaf.rodriquezr@unilibrebog.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Biomasa, Bioenergía y Biocombustibles

RESUMEN

En los últimos años se ha evidenciado una crisis energética por el mal uso y agotamiento de los recursos fósiles, generando una repercusión en el medio ambiente. Debido a esto, la generación de alternativas energéticas ha evolucionado en gran manera, entre estas la densificación de biomasa la cual permite el aprovechamiento de recursos agroindustriales actualmente desperdiciados. La densificación de biomasa posee ventajas como lo son el aumento de la densidad energética del material, disminución de volumen, mayor facilidad de almacenamiento y transporte del material. Sus características físico - químicas aportan al proceso puentes de unión entre las partículas, su contenido de lignina natural hace que no se necesiten de aglutinantes adicionales y la selección del tamaño de partícula es esencial y un factor importante para la durabilidad del pellet obtenido por la densificación, la mezcla de varios de estos residuos mejora la fuerza y resistencia de los mismos y podría reducir los costos del proceso. Todos estos parámetros se pueden ver reflejados en los resultados obtenidos del presente proyecto. Finalmente, se evidencia que el uso de estos materiales y el proceso de densificado pueden ir de la mano en pro de obtener un cambio de energías fósiles a energías alternativas y totalmente renovables, mostrando varios beneficios tanto para la comunidad como para la atmósfera en lo que refiere a la calidad del aire por la disminución en la cantidad y calidad de gases de efecto invernadero que son emitidos a la atmósfera cuando los biocombustibles entran en proceso de combustión.

Palabras claves: Biomasa, pellets, densificación, mezcla, tamaño de partícula

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico que se ha experimentado a nivel mundial trae consigo el aumento en el consumo energético, lo que genera contaminación atmosférica que tiene un impacto considerable en la salud humana, la flora, la fauna y el ambiente en general. La aparición de nuevas industrias y tecnologías conlleva a un mayor consumo energético, el cual se provee generalmente, con combustibles fósiles.

En este consumo se incluye la producción de bienes y servicios y la energía necesaria para transportarse, comunicarse, divertirse y realizar actividades del hogar. Según el Índice de las Naciones Unidas para el Desarrollo Humano (HDI), el consumo de energía por persona debe ser aproximadamente de 4kW para poder obtener un alto nivel de desarrollo, sin embargo, actualmente el consumo de energía a nivel mundial (ver Figura 1) es de 15 kW/persona (aproximadamente 14,22 Btu/seg*persona) [1]

Figura 1. Relaciones del consumo energético primario per cápita entre el 2008 y las HDIs para 170 países. [1]

Además del agotamiento de recursos fósiles, los precios de estos combustibles se ven influenciados por situaciones políticas, generando incertidumbre en el suministro de los mismos. Lo que genera dudas sobre la población acerca de las medidas que se implementarán a futuro para evitar una crisis energética a gran escala.

Existen una gran cantidad de problemas ambientales que se desprenden de los procesos de combustión de fuentes fósiles (que son los procesos de producción de energía más utilizados), como lo son la emisión de

gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, ozono, etc.), material particulado, precursores de lluvia ácida, mala calidad atmosférica, calentamiento global. Las energías renovables y alternativas han evolucionado en las últimas décadas con el fin de convertirse en una de las soluciones que podrían evitar una crisis energética, la biomasa se encuentra dentro de estas energías renovables, sus propiedades fisicoquímicas son similares al carbón, razón por la cual se han vuelto tan atractivas en el mercado energético, teniendo también como factor que el único egreso que representan estos residuos es el transporte hacia el lugar donde se vayan a procesar. Uno de los métodos para el aprovechamiento de esta fuente de energía es la densificación, que consiste en reducir el volumen de la biomasa mediante sistemas de compactación mecánica.

Una ventaja al emplear biomasa como sustituto de los combustibles fósiles, se encuentra en el hecho de que ésta presenta un balance neutro para el ciclo de dióxido de carbono, por lo tanto, en el proceso de combustión no se introducen cantidades adicionales de CO₂, como sí ocurre cuando se queman derivados del petróleo y carbón.

La biomasa se puede emplear directamente como combustible o ser materia prima para la obtención de biocombustibles (como pellets o briquetas). Los pellets son un combustible a base de biomasa densificada que no emplea aglutinantes adicionales, de fácil manejo y transporte en comparación con la materia prima que se obtiene usualmente de los cultivos. El aglutinante natural de estos combustibles densificados es la lignina presente en la biomasa.

La densificación de biomasa posee varias ventajas como lo son el aumento de la densidad energética del material, disminución de volumen, mayor facilidad de almacenamiento y transporte [2]. A pesar de ser un tema nuevo en la industria, ya se cuentan con varias investigaciones de profesionales expertos (ver referencias) en temas de energías renovables que demuestran la viabilidad del proceso de transformación de este tipo de residuos y que apoyan el desarrollo de este proyecto que principalmente pretende evaluar el efecto del tamaño de partícula en el proceso de densificación. Varios investigadores han realizados estudios sobre los factores que afectan la resistencia y durabilidad de los productos de biomasa densificados [3], la caracterización de pellets [4], la producción de pellets de biomasa para la generación de energía [5], el efecto del tamaño de partícula en pellets de aserrín y carbón [2].

MATERIALES Y MÉTODOS

Las materias primas que se emplearon para el desarrollo del proyecto son residuos agroindustriales (biomasa) tales como, Cáscara de Coco obtenida de la central de Abastos de Bogotá, Cuesco de Palma de Aceite proveniente de cultivos de Villavicencio – Meta y el Aserrín de Pino adquirido de un aserradero.

El aserrín, la cáscara de coco, y el cuesco fueron molidos con un molino de martillos modelo MAQ-MM. PIM (III) 03 y debidamente separados con unos tamices de malla 20, 40, 60, 100 y 200 (rangos entre 75 – 850 µm).

Los análisis próximo y último de cada material se hallaron en el Servicio Geológico Colombiano. La humedad fue calculada siguiendo la ASTM D3173-11 [6], las cenizas según la ASTM D3174-12 [7], el material volátil con la ASTM D3175-13 [8] y el carbón fijo presente en cada material haciendo el balance [9]. En cuanto al análisis último, el contenido del carbón, hidrógeno y nitrógeno se determinaron según la ASTM D5373-08 [10], el azufre con la ASTM D4239-12 [11] y el oxígeno presente se calculó con el balance [12]. La preparación de mezclas de biomasa que se realizaron fueron: Aserrín (80%) – Coco (20%), Aserrín (80%) – Cuesco (20%), Coco (80%) – Cuesco (20%) con el fin de poder compararlos.

La densificación de la biomasa se llevó a cabo con una Compactadora de biomasa modelo 2015 con ayuda de una máquina de ensayos universales de la Universidad Libre.

El poder calorífico de las muestras se realizó con una bomba calorimétrica PARR 1341.

El análisis microestructural de cada material con un tamaño de partícula pequeña se desarrolló en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia: microscopía óptica y fluorescente.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tamaño de partícula

Se realizaron varias densificaciones variando el tamaño de partícula, escogiendo el tamaño medio, malla de 40 y 60 (400 y 250µm respectivamente). En varias pruebas se densificó con un tamaño de partícula pequeño, malla 100 y 200 (150 - 75µm respectivamente), evitando compactación de la biomasa; se densificó con un tamaño de partícula grande (malla 20 – 850

µm) presentando varios puntos de quiebre para el pellet por medio de sus poros ya que no prensa de manera correcta debido a su tamaño de partícula e irregularidad de la biomasa; análisis que se puede verificar según Kaliyan [3].

Análisis próximo

La Tabla 1, muestra los resultados obtenidos del análisis próximo, que son los parámetros que componen la biomasa en estudio. La humedad es clave para el rendimiento energético en procesos de combustión y la formación de puentes de unión y fuerzas intermoleculares en la densificación de la biomasa, sólo si se encuentra en un rango de 6 – 12% [3]. La cantidad de cenizas representa la biomasa sólida que no es combustible por kilogramo de biomasa y está directamente ligado con el poder calorífico del material, los valores que estos materiales presentan no son tan altos, lo cual es un beneficio porque entre menor sea su valor, menor es el efecto que tiene sobre los costos de consumo energético en la transformación de la biomasa. La energía que entrega la biomasa cuando entra en proceso de combustión es la que se representa en los parámetros faltantes (material volátil, carbón fijo), que se observan en la tabla 1, los tres materiales tienen altos porcentajes, lo que significa una gran oferta energética de la biomasa [2]. La cáscara de coco por ser el material con mayor carbono fijo entre los tres, es el material que mayores valores de energía entrega en el proceso de combustión.

Análisis último

La Tabla 2, muestra la composición de elementos presentes dentro de los materiales analizados (coco, cuesco y aserrín), por medio de estos resultados se obtiene la fórmula molecular de cada material y también permite calcular la cantidad de gases de efecto invernadero se van a producir cuando la biomasa densificada (pellets) entren en proceso de combustión, los contenidos de azufre y nitrógeno son bajo, por ende los GEI producidos (NOx, SO2) también son bajos. Por medio de los resultados se evidencia una buena relación de carbono – oxígeno beneficiando la combustión de la biomasa

Tabla 1. Análisis próximo de la biomasa, resultado en % (ASTM D3172)

Parámetros	Aserrín	Cuesco de palma	Cáscara de coco
Humedad	7,58	3,55	5,73

Material volátil	77,96	81,06	61,53
Carbón fijo	14,2	10,06	29,15
Cenizas	0,26	5,33	3,59
TOTAL	100	100	100

Tabla 2. Análisis último de la biomasa, resultado en % (ASTM D3176)

Parámetros	Aserrín	Cuesco de palma	Cáscara de coco
Carbón	37,76	45,28	49,54
Hidrógeno	5,94	5,13	7,57
Nitrógeno	0,09	0,74	1,17
Azufre	0	1,17	0,08
Oxígeno	55,95	42,35	38,05
Cenizas	0,26	5,33	3,59
TOTAL	100	100	100

Microscopía óptica y de fluorescencia

La microscopía óptica (ver Figura 2) permite verificar la forma, textura, combinación de fibras, lignina, grasas, división del material evaluado.

Según otro estudio realizado por el investigador Kaliyan [13], la biomasa tiene celulosa, hemicelulosa, lignina, proteína, almidón, grasas, humedad, carbohidratos solubles en agua, cenizas. Los factores que afectan la adhesión de partículas son el porcentaje de proteína, concentración de pectina y el porcentaje de material del tallo.

La lignina es un polímero orgánico que es fundamental en la madera, su contenido debe ser del 13 al 34% dentro de la biomasa, se caracteriza por ser un aglutinante natural, evitando que en la densificación de la biomasa se utilicen aglutinantes artificiales, en altas temperaturas la lignina suaviza y ayuda el proceso de unión [3]

La fluorescencia en los tejidos vegetales se da por la presencia de moléculas aromáticas. Los carbohidratos puros (celulosa, hemicelulosa y almidón), moléculas de lípidos y grasas no emiten fluorescencia.

- Verde o amarillo:** representa componentes de proteína.
- Blanco:** Representa la cutícula.
- Azul brillante:** Lignina que debe ser menor al 34% de la composición del material.

Figura 2. Microscopía óptica. Aserrín de Pino

Figura 3. Microscopía fluorescente, Aserrín

Densidad

Se determinó la densidad de los materiales puros (biomasa), de las mezclas de biomاسas, pellets puros y pellets de biomasa mezclada. Con los siguientes resultados obtenidos:

Tabla 3. Promedio de las densidades calculadas para materiales puros

Biomasa pura (kgm-3)		
Aserrín	Coco	Cuesco
217,47	77,53	294,33
Pellets puros(kgm-3)		
Aserrín	Coco	Cuesco
502,22	869,08	582,41

Tabla 4. Promedio de las densidades calculadas para materiales mezclados.

Biomasa mezclada(kgm-3)		
Aserrín – coco	Aserrín – cuesco	Coco – cuesco
157,13	345,07	282,93
Pellets mezclados(kgm-3)		
Aserrín – coco	Aserrín – cuesco	Coco – cuesco
561,80	685,54	678,94

La tabla 3 y 4 permiten hacer la comparación entre un ante (polvo) y un después (pellet) de realizar el proceso de densificación, lo cual muestra un resultado favorable para la densificación de materiales agroindustriales. Se puede analizar con los datos obtenidos de la Tabla 3, que la densidad del aserrín se duplica al momento de densificar, aumenta un 2,31 veces la densidad inicial, el coco aumenta su densidad 11,21 veces la inicial, este número tan elevado se debe a que la cáscara de coco es un material poco denso (liviano) y cabe más material en el mismo volumen medido para todos; el cuesco también incrementa su densidad casi 2 veces la inicial.

Lo que quiere decir es que si tenemos más material dentro de un volumen más reducido, obtenemos una mayor densidad energética, factor importante para la elección de este tipo de energía renovable. Según Kalyan [3] la densidad de un producto densificado (en este caso el pellet) debe estar entre 600 – 800 kgm-3, lo que indica un aumento de 2 a 10 veces la densidad inicial de la biomasa (polvo).

Resistencia al impacto

Los resultados que arroja este laboratorio es la durabilidad de un pellet, qué tan duradero sí se almacena, sí se transporta, si en algún proceso sufre una caída y no generar pérdidas para la empresa manufacturera de pellets.

El laboratorio se realizó con pellets puros y mezclas, se obtuvieron los resultados revelados en la Tabla 5 que determinan la durabilidad de los mismos.

Tabla 5. Resistencia al impacto obtenido en los laboratorios de la Universidad Libre

Biomosas puras (%)		Mezcla de biomosas (%)	
Aserrín	72,16	Aserrín-Coco	90,87
Coco	79,06	Aserrín-Cuesco	7,47
Cuesco	11,84	Coco-Cuesco	42,27

El cuesco es un material que tiene poca humedad, pero es muy graso, lo que impide que establezca fuer-

tes puentes de unión cuando se densifica y esto lo afirman los resultados mostrados.

Los pellets con mayor durabilidad son el aserrín y el coco, pero cuando estos se mezclan, el porcentaje de durabilidad incrementa, esto se debe a los puentes de unión formados en el momento del prensado, parámetro importante para determinar la calidad del producto y otros parámetros importantes.

Poder calorífico

Éste es un parámetro muy importante a evaluar, porque refleja la cantidad de energía que entrega por unidad de masa al momento en el que un material se encuentra en proceso de combustión. Existe una relación entre el análisis último, el análisis infrarrojo y el poder calorífico, donde se evidencia que la relación carbono-oxígeno aumenta el poder calorífico de los materiales en estudio. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Poder calorífico de las biomosas en estudio en la Universidad Libre.

Biomosas puras (MJ/Kg)		Mezcla de biomosas (MJ/Kg)	
Aserrín	18,4	Aserrín-Coco	18,38
Coco	18,3	Aserrín-Cuesco	19,48
Cuesco	23,8	Coco-Cuesco	19,40

Estos valores reafirman lo que se ha dicho anteriormente. El cuesco es uno de los materiales que más entrega energía y el que está más cerca al poder calorífico del carbón: 30MJ/Kg, pero en mezcla el valor más alto es del aserrín-cuesco. [2]

CONCLUSIONES

Los resultados que se mostraron en el desarrollo del artículo revelan los potenciales beneficios del proceso de densificación para la biomasa. La cantidad de lignina (menor al 34% en contenido) que posee la biomasa y que se muestra en los resultados de microscopía junto con la humedad del material incrementan los puentes de unión que se activan cuando se ejerce un elevado esfuerzo sobre la biomasa, garantizando que la flexibilidad y durabilidad de los pellets sea mayor. La comparación realizada entre la biomasa densificada y la no densificada es bastante relevante teniendo en cuenta las dimensiones del pellet, lo que indica un incremento paralelo en la densidad energética del mismo. La biomasa utilizada muestra un contenido muy

bajo de azufre y nitrógeno, lo que permite que en un proceso de combustión la emisión de gases de óxidos de nitrógeno y de azufre emitidos a la atmósfera no son significativos.

Finalmente, los parámetros analizados para los pellets certifican a la biomasa (residuos agroindustriales: aserrín de pino, cáscara de coco y cuesco de palma de aceite) como una energía alternativa y renovable que posee buena eficiencia energética, baja cantidad de cenizas y un alto material volátil, facilitando su proceso de combustión si se desea aplicar en calderas o en estufas de leña.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Dale; ONG, R. Energy, "Wealth and Human Development: Why and How Biomass Pretreatment Research Must Improve" *Biotechnology progress*. Vol. 28, pp 893 – 898, Jul – Ago, 2012.
- [2] C. Forero, J. Jochum y F. Sierra, "Effecto of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets". *Ingeniería e Investigación*, vol. 1, nº 35, pp. 17 - 23, 2015..
- [3] N. Kaliyan y R. V. Morey, "Factor affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass and bioenergy*, nº 33, pp. 337 - 359, 2009
- [4] Z. Augustine y R. Balasubramanian, "Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars," *Applied Energy*, nº 113, pp. 1315 - 1322, 2014.
- [5] C. Forero, C. Guerrero y F. Sierra, "Producción y uso de pellets de bioma para la generación de energía térmica: Una revisión a los modelos del proceso de gasificación," *Revista Iteckne*, nº 9, pp. 21 - 30, 2012.
- [6] A. S. f. T. a. Materials, «Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke ASTM D3173 - 11,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D3173.htm>.
- [7] A. S. f. T. a. Materials, «Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal ASTM D3174 - 12,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D3174.htm>.
- [8] A. S. f. T. a. Materials, «Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke ASTM D3175 - 11,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D3175.htm>.
- [9] A. S. f. T. a. Materials, «Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke ASTM D3172 - 13,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D3172.htm>.
- [10] A. S. f. T. a. Materials, «Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal ASTM D5373 - 08,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D5373-08.htm>.
- [11] A. S. f. T. a. Materials, «Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion ASTM D4239 - 12,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D4239-12.htm>.
- [12] A. S. f. T. a. Materials, «Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke ASTM D3176 - 15,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D3176.htm>.
- [13] N. Kaliyan y R. V. Morey, "Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and," *Bioresource Technology*, nº 101, pp. 1082–1090, 2010.

ENERGÍAS ALTERNATIVAS

DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EFICIENTE Y ASEQUIBLE PARA ILUMINACIÓN PÚBLICA DE ZONAS NO- INTERCONECTADAS.

Macías Ferro, Hugo Andres ¹
López, Y. U. ¹
Gaviria Cataño, Fabián Andres ¹

¹ Universidad Autónoma de Occidente, Semillero de investigación en energías renovables, GIEN
hamacias@uao.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas: Energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y mareomotriz

RESUMEN

Se presenta el diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado para iluminación de lugares públicos en zonas no interconectadas mediante una metodología con criterios de eficiencia lumínica. El diseño empieza determinando el cuadro de carga en el cual se calcula la potencia que va a consumir la luminaria, luego se halla la capacidad de la batería que va a alimentar la luminaria durante periodos de 12 horas continuas, con los datos de la batería definida y la potencia consumida por la carga se calcula el panel fotovoltaico necesario para que recargue la batería durante el día. El diseño es validado mediante herramientas computacionales como SaberRD y Dialux, la primera para simulaciones del comportamiento de la batería y la segunda para los niveles de iluminación generados. Con esto se logró un sistema de iluminación que emplea materiales reciclables como son las botellas de PET y que proporciona una iluminación de clase P5, la cual puede ser utilizada en jornada nocturna en zonas rurales con bajo tránsito de peatones y ciclistas preservando el carácter arquitectónico del ambiente [12]. El prototipo de iluminación diseñado por medio de módulos fotovoltaicos permite mejorar la calidad de vida y seguridad de los habitantes de diferentes zonas no interconectadas de nuestro país.

Palabras claves: Eficiencia, ZNI, LED, Solar, SaberRD, SSFV.

INTRODUCCIÓN

La obtención de energía eléctrica, a partir de fuentes renovables no convencionales, no solamente debe considerar una solución técnica si no es necesario garantizar soluciones sostenibles [1]. A nivel mundial, actualmente en diversos países de Asia, África y América Latina, se están desarrollando programas de investigación y realizando aplicaciones para incrementar la capacidad solar fotovoltaica en zonas aisladas, mejorando así la calidad de vida de los habitantes aislados de las redes eléctricas [2, 4].

De la misma manera, en América Latina y resaltando en Colombia, estas soluciones se están planteando en lugares de difícil acceso como las denominadas zonas no interconectadas (ZNI). En este aspecto, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) publicó un estudio donde se revela que cerca del 60% del territorio no está integrado al Sistema Interconectado Nacional de Colombia (SIN) [5]. Este alto porcentaje implica, que muchas veredas a nivel nacional deben generar su propia energía por medio de la quema de combustibles fósiles, y así cubrir sus necesidades eléctricas, sin incluir la iluminación de los espacios públicos, factor que impacta en gran medida la seguridad y movilidad del sector rural.

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema solar fotovoltaico (SSFV) de iluminación pública, que utiliza botellas plásticas recicladas de PET con tecnología LEDs de alto brillo (HB-LED) [6], haciéndola económica y ambientalmente sostenible y de fácil reparación. La tecnología LED seleccionada es de color blanco frio, que incrementa la percepción visual de los espacios y reduce la cantidad de lumens necesarios para una buena iluminación [7], sistema que ya ha sido puesto en marcha en el proyecto de investigación titulado “Sistema de iluminación 24H20” en el cual se comprobó el correcto funcionamiento de la propuesta de iluminación, la cual será base fundamental para la implementación y diseño en iluminación pública.

MATERIALES Y MÉTODOS

El primer paso para la elaboración del SSFV es determinar el tipo de carga y el consumo energético que se va a alimentar con el sistema, a través de un cuadro de carga. En este caso, se usan dispositivos HB-LED (High Brightness Light emitting Diode) de 1W que producen alrededor de 120 lm ($I_f = 320$, $V_f = 3.1V$) como el mostrado en la figura 1. Cada luminaria estará compuesta por 4 series de 3 HB-LED, lo que da una carga

de 16W incluyendo las perdidas en las resistencias limitadoras de corriente. En la tabla 1 se puede ver que el uso de la luminaria se ha dividido en dos tiempos uno de 6pm a 10pm y de 10pm a 6am, esto con el fin de disminuir el consumo eléctrico en horas de la madrugada donde la circulación de personas es menor [8].

Figura 1. HB-LED 1W. Catálogo del fabricante. [http://www.digikey.com/product-detail/en/seoul-semiconductor-inc/W42180/897-1270-1-ND/5410421]

Tabla 1. Cuadro de cargas de la luminaria.

Elemento	Poten- cia	Tensión DC	Corriente DC	Horas uso	Energía	Amperios Diarios
Luminaria (6pm – 11pm)	16W	12 V	1.28 A	5 horas	76.8Wh/ Dia	6.4Ah/Dia
Luminaria (11pm – 6am)	8W	12 V	0.64 A	7 horas	53.76Wh/ Dia	4.48ah/ Dia
TOTAL					130.56Wh/ Dia	10.88Ah/ dia

Debido a que el sistema solo demanda energía en horas de la noche, el siguiente paso es dimensionar la batería que va a suministrar dicha potencia, para esto se utiliza la ecuación (1) [9].

$$C = \frac{(TotalAh_{dia} \cdot N)}{(0,9 \times PDD)} \tag{1}$$

Dónde:

C: capacidad del banco de baterías (Ah)

N: Número de días de autonomía del sistema elegido.

0.9: Factor de rendimiento de las baterías en el ciclo de carga – descarga (90 %).

P.D.D: Es profundidad de descarga diaria permitida al banco de baterías electroquímicas.

En general, para baterías del tipo estacionaria de plomo ácido con bajo contenido de antimonio (Sb) en

la placa positiva se recomienda una profundidad de 70 % (0,7), para placa de Plomo Calcio (Ca) se recomienda una profundidad de descarga diaria de 50 % (0,5). Sí se utiliza una batería de Plomo ácido del tipo de arranque automotriz se recomienda 30 % de profundidad (0,3). Para todas ellas la densidad del electrólito recomendada es de 1,2115 (+/- 15 %) g/ml en función de nuestro clima tropical. (Ejemplo en Baterías estacionarias para energía solar, se observa el dato: Suitable for cycling: up to 1400 cycles, 80% DOD). Personalmente creo que una batería no debe descargarse hasta su 30%, es decir, profundidad de descarga solo 70%. Para este caso el total de amperios hora día se multiplico por un factor de seguridad del 10% que incluye perdidas y consumo de la electrónica de control, se utilizó una autonomía de un día, dando como resultado una batería de 12 V de 20Ah.

El siguiente paso, es dimensionar el SSFV cuya función es la de cargar la batería durante el día, para esto se emplea como base la ecuación (2) mostrada en Notton [9].

$$N = \frac{\text{Energía Requerida}}{\text{Energía Producida}} = \frac{\text{Total Wh/Día(Carga)} + \text{Wh/día (recarga batería)}}{P_{nom} * HEP} \tag{2}$$

- Dónde:
- N: número teórico de paneles solares FV necesarios
- Wh/día (carga) es la energía total que se obtiene del cuadro de carga.
- Wh/día (Recarga batería) es la energía total que se requiere para recargar la batería si está al 70% de su capacidad.
- Pnom: Potencia nominal del panel a utilizar (un solo panel)
- HEP: Es el número teórico de las horas equivalentes de potencia. Las HEP se calculan con la ecuación 3, dividiendo el índice de radiación solar del sitio por una constante de fabricación de los paneles.

$$HEP(h / día) = \frac{\text{Índice radiación solar } (W / m^2)}{1000 \text{ } W / m^2} \tag{3}$$

Al aplicar la ecuación 3 y considerando una radiación solar de 4560 W/m2, el cual es nivel de radiación promedio en el valle del cauca, se tiene un HEP de 4.5, usando los valores del cuadro de carga y un 10% de margen de seguridad la energía total requerida por el sistema seria de 215,56Wh/Día, para nuestro caso se utiliza un panel solar poli-cristalino de 70W (Vnom = 17,4 VDC, Inom = 4A) con estos datos y los resultados de las ecuaciones 2 y 3, nos daría que el número de paneles necesarios es de uno.

Posteriormente se analiza y selecciona el regulador de carga de la batería. Para esto hay que tener en cuenta que este dispositivo sea capaz de recibir el doble de la corriente nominal y voltaje nominal generados por el panel y entregar el voltaje de necesario para la batería de 12 voltios en nuestro caso.

Finalmente, de la selección de todos los componentes del sistema, es necesario diseñar un circuito de control que permita que la luminaria solo se encienda en las noches o en los periodos de baja luminosidad natural y que controle los tiempos y la potencia entregada a la carga. Para esto es empleado un microcontrolador ATmega328 el cual se encargará de monitorear el voltaje entregado por el panel con el fin de determinar si el nivel de iluminación natural está bajo, y una RTC (Real Time Clock) para comprobar los tiempos de encendido, apagado y consumo de la luminaria.

En la figura 2, se puede ver como el consumo de potencia en la luminaria está determinado por el estado de los interruptores s1 y s2 con lo cual se puede controlar si se prende una, dos o ninguna de las ramas de LED. Cada rama LED está compuesta por tres HB-LED en serie, los cuales son sellados para impedir la entrada de agua al interior de ellos y prevenir la oxidación de sus terminales. La razón por la cual los HB-LED son introducidos en agua es aprovechar las propiedades de difracción para distribuir la luz generada con un ángulo de 330 grados evitando el uso de ópticas y aprovechar esa masa de agua como disipador de calor, lo cual es de vital importancia para mejorar el desempeño de los HB-LED ya que temperaturas por encima de los 70C disminuyen el tiempo de vida de los dispositivos de 60.000 horas a solo 10.000 horas [10],[11]

Figura 2. Diagrama del sistema implementado.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Usando SABER RD se simulo el comportamiento del voltaje en el banco de baterías durante un noche

normal de trabajo en la cual se presenta dos periodos de trabajo, uno de 5 horas con un consumo de 16W/h y otro de 7 horas con 8W/h, la figura 3 muestra como utilizando una batería de 20Ah, luego de las 12 horas de consumo de la *luminaria*, el voltaje al final del ciclo está cercano a los 12 V, mientras que, si se usa una batería de 15Ah, la carga de la batería decrece más rápido y el voltaje al final del ciclo está por debajo de los 11,75 V. Esta diferencia en el voltaje muestra que una batería de 15Ah al final de una noche de trabajo presenta un nivel de descarga más alto lo cual implicaría una reducción en la autonomía del sistema. La parte inferior de la gráfica muestra el consumo de corriente por parte de la luminaria durante el ciclo de 6pm a 6 am.

Figura 3. Resultados simulación comportamiento de la batería.

Utilizando la herramienta computacional (dialux4.0), se realizó una simulación de la iluminación de una luminaria de 12 HB-LED (16W), generando 1300lm. En la figura 4, se puede apreciar la iluminación generada por el sistema durante la noche (imagen izquierda) y los niveles de lux (imagen derecha), estos valores corresponde a una iluminación clase P5 la cual exige una iluminancia promedio de 5 lux y que es apropiada para zonas rurales con bajo tránsito de peatones y ciclistas según el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP [12].

Figura 4. Simulación de iluminación pública Dialux.

La simulación de la descarga de la batería presentado en la figura 3 , comprueba que la capacidad de la batería calculada mediante el procedimiento descrito en este documento es la mínima necesaria para que el

sistema opere adecuadamente durante un periodo de 12 horas de acuerdo con lo establecido en el cuadro de carga, si se llegase a colocar una batería de menor capacidad el sistema no funcionaría correctamente debido a que la batería llegaría antes de las 12 horas a un voltaje muy bajo que haría que los LED no funcionaran correctamente haciendo que generaran menos lumens.

CONCLUSIONES

Los procesos de diseño y simulación previos a cualquier selección de luminarias, reducen las incertidumbres en la cantidad de lúmenes con que se iluminará un espacio. La herramienta computacional permite además, tener una clara idea del resultado del espacio con la iluminación calculada con este proceso y la validación con las figuras que arroja el programa. El panel de 70W garantiza que la energía entregada por la batería (131Wh/día) se pueda recuperar con al menos cuatro horas de funcionamiento del panel a media potencia (35Wh). La luminaria diseñada puede ser usada en zonas rurales que no tienen acceso a la red eléctrica nacional proporcionando mayor calidad de vida y seguridad a los habitantes ya que genera suficiente luz para que las personas puedan transitar por las veredas. El dimensionamiento del sistema fue pensado de tal forma que el consumo energético fuera el menor posible para que la batería y el panel fotovoltaico fueran de la menor capacidad posible garantizando un adecuado funcionamiento, motivo por el cual la luminaria tiene dos consumos durante la noche uno de 16W al inicio de la noche y otro de 8W en la madrugada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Autónoma de Occidente. Programa de apoyo a investigadores y Programa de Apoyo al Semillero de Investigación en Energías Renovables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Cumbre de Johannesburgo. (2002, Agosto 24) Cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible. Apartado "la energía" [En línea]. Disponible en cinu.org.mx Dirección: <http://www.cinu.org.mx/eventos/conferencias/johannesburgo/medios/carpeta/energia.htm>

[2] Debajit Palit, Solar energy programs for rural electrification: Experiences and lessons from South Asia, *Energy for Sustainable Development*, Volume 17, Issue 3, June 2013, Pages 270-279

[3] Abdul Ghafoor, Anjum Munir, Design and economics analysis of an off-grid PV system for household electrification, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 42, February 2015, Pages 496-502

[4] H. Rezzouk, A. Mellit, Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic–diesel–battery hybrid energy system in the north of Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 43, March 2015, Pages 1134-1150.

[5] CREG, “Propuesta para remunerar la generación, distribución y comercialización de Energía Eléctrica en las ZNI” – Colombia. Bogotá. 2014.

[6] H. Macias, Y.lopez. Low cost off-grid solar pv and led lightning system. *Congreso Internacional Andescon 2014*, ISBN: 978- 1-4799-6685-1

[7] Philips. Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems, White paper, 2004, Pages 16-20.

[8] M. Hulsebosch, P. Willigenburg, J. Woudstra, and B. Groenewald, “Direct current in public lighting for improvement in LED performance and costs,” in *2014 International Conference on the Eleventh industrial and Commercial Use of Energy*, 2014, pp. 1–9.

[9] G. Notton, V. Lazarov, L. Stoyanov, Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations, *Renewable Energy*, Volume 35, Issue 2, February 2010, Pages 541-554.

[10] Zhang, L, Liu Minshan, Dong Qiwu, “Cooling devices for high power LED illuminators”, *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Shenzhen)*, 2011.

[11] G. Zdunic, “Public lighting - road to energy efficiency,” in *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 2015, pp. 1–6.

[12] Ministerio de Minas y Energía, “Iluminacion publica” en *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP*, 2010, pp.188.

PRODUCCIÓN FOTOCATALITICA DE HIDRÓGENO BASADA EN EL MINERAL ARENA NEGRA COMO SEMICONDUCTOR (Estudio Preliminar)

López Vázquez, Andrés Felipe ¹
Reyes Gómez, Gustavo Andrés ²

¹ Universidad Libre sede Bogotá
² Universidad Ecci
congresoenergiasostenible@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas: Energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y mareomotriz

RESUMEN

En la presente investigación se utilizó mineral arena negra (RM), para la obtención de las fracciones M1, M2 y NM mediante aplicación de campos de intensidad magnética correspondientes a 0.0311 y 0.1645 Teslas, respectivamente. Dichas fracciones fueron caracterizadas estructural, química y ópticamente mediante fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de barrido SEM/EDX, y espectroscopia ultravioleta-visible. Tanto (RM) como las fracciones, se probaron como fotocatalizadores para la generación de hidrógeno a partir de soluciones de EDTA, el cual fue utilizado como agente donador de electrones. Los resultados mostraron que la reactividad del sistema para la producción fotocatalítica de hidrógeno es diferente para todas las fracciones después de 2.0 horas de reacción y que M1 presentó la mayor actividad fotocatalítica. Esta fracción (M1) se utilizó para evaluar el efecto de variables tales como concentración del mineral, pH y concentración de agente de sacrificio en la generación fotocatalítica de hidrógeno bajo irradiación UV artificial. Las mejores condiciones para la generación de hidrógeno fueron 1.0 g/l de catalizador M1, pH 2.0 y una solución EDTA 4.0 mM. Para estas condiciones, la producción fue de 21.05 $\mu\text{moles H}_2 / \text{g h}$ al cabo de 2.0 horas de tratamiento.

Palabras claves: Arena Negra, fotocatalizador, hidrógeno, EDTA

INTRODUCCIÓN

La combustión convencional de los recursos energéticos disponibles, especialmente del carbón y los combustibles fósiles, producen una gran cantidad de dióxido de carbono (CO_2) que causan el calentamiento global. Además, su consumo está aumentando rápidamente mientras que sus reservas están disminuyendo cada vez más. El hidrógeno se ha identificado como una prometedora alternativa de energía almacenable y limpia para el futuro [1]. Éste se utiliza extensivamente como combustible porque produce un alto rendimiento energético, posee un alto poder calorífico, no contamina y se puede almacenar fácilmente.

La producción de hidrógeno todavía se fundamenta en materias primas fósiles generando dióxido de carbono (CO_2) como subproducto, y tan sólo un 5% se produce mediante electrólisis del agua [2].

En los últimos años se ha incrementado el interés en desarrollar nuevos métodos para generar hidrógeno a partir de recursos renovables y sostenibles. La generación fotocatalítica de hidrógeno se presenta como una alternativa de producción limpia que convierte energía solar en energía química aprovechable. Los métodos propuestos para tal fin aprovechan la disociación fotoelectrolítica del agua o la utilización de semiconductores suspendidos en agentes de sacrificio [3].

El dióxido de titanio (TiO_2) ha sido considerado como el fotocatalizador por excelencia porque es altamente fotoactivo, barato, no tóxico, químicamente estable y ambientalmente amigable, sin embargo se puede activar solamente bajo irradiación de la luz UV ($\lambda < 400 \text{ nm}$) la que es aproximadamente el 4% del espectro solar debido a su banda prohibida de energía (3,2 eV para Anatasa y 3,0 eV para Rutilo) [4].

Por esta razón los estudios para obtener semiconductores suspendidos de estrecho ancho de banda que aprovechen una proporción mayor del espectro solar se han incrementado en los últimos años [5]. El semiconductor es el elemento clave en cualquier reacción fotocatalítica y se han propuesto muchas alternativas en ese sentido [6] sin embargo, la búsqueda de materiales fotoactivos con nuevas estructuras de bandas se ha enfocado en los compuestos de la forma M_2O_3 , en la cual M es un metal [7]. Puesto que el TiO_2 posee un amplio ancho de banda, su dopaje con metales de transición puede ser una herramienta importante para mejorar sus propiedades fotocatalíticas, principalmente el incremento de su respuesta a la región visible. En particular, el hierro (III) sobre el TiO_2 ha sido tema de

muchas investigaciones que incluyen la preparación, caracterización, estudios de características espectroscópicas, dinámica de transferencia de cargas, captura y recombinación y comportamiento fotocatalítico de este acople [8] debido a que la combinación de dos semiconductores muestra mejor actividad fotocatalítica a causa de una mejor separación de las cargas. Se han desarrollado varios estudios de éste acople en particular ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$) mejorando la actividad fotocatalítica en la región visible, siendo significativamente mayor que el TiO_2 puro [9]. También, se han realizado ensayos para la utilización de residuos industriales para promover reacciones fotocatalíticas de degradación de compuestos orgánicos contaminantes.

Uno de estos desarrollos se encaminó al estudio de la ilmenita natural (FeTiO_3) como semiconductor, además de no ser muy profundo, se encuentran pocas referencias en la literatura al respecto. Esto se debe en parte que el mineral ha sido objeto de estudio desde el punto de vista metalúrgico [10] y como precursor en la manufactura del TiO_2 . Este es un mineral de características particulares y en su composición se pueden encontrar óxidos de magnesio calcio y silicio. Estos agregados podrían mejorar sus propiedades fotocatalíticas no sólo por su estructura sino por los niveles energéticos presentes debido a los diferentes anchos de banda presentes por los óxidos que la componen y podría tener un gran potencial de aplicación en la generación fotocatalítica de hidrógeno. En ese sentido el objetivo de la presente investigación fue evaluar la producción fotocatalítica de hidrógeno a partir del mineral arena negra como catalizador. El catalizador se caracterizó química superficial, y ópticamente y se evaluaron el efecto de las variables: tipo de catalizador, concentración del catalizador, pH y agente de sacrificio en la generación fotocatalítica de hidrógeno bajo irradiación UV artificial.

La generación fotocatalítica de hidrógeno utilizando un catalizador basado en mineral arena negra con contenido de ilmenita puede ser una alternativa viable en el país puesto que Colombia posee varios yacimientos primarios y secundarios de minerales de titanio cuyo potencial está aún por explorar y por encontrarse en la zona ecuatorial tiene disponibilidad del recurso solar todo el año. La generación de hidrógeno basada en la utilización de una energía renovable como el sol y la utilización de minerales con contenido de ilmenita, puede constituirse en una herramienta que impulse el desarrollo energético de manera ambientalmente razonable en el país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación del semiconductor a partir de arena negra

Se recogieron (30 kg) de arena negra procedente de las playas de Santa Marta (Magdalena Colombia). En vista que el mineral presentó propiedades magné-

ticas debido a la presencia de hierro en su estructura (magnetita, hematita, etc.), se sometió a una separación utilizando campos de intensidad magnética de 0,0311 y 0,1645 Teslas, respectivamente. A partir de RM se obtuvieron tres concentrados denominados M1 (0,0311T), M2 (0,1645T), y una fracción no magnética NM. El diagrama de la preparación del material se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Representación esquemática de la preparación del material a partir de arena negra para la generación fotocatalítica de hidrógeno.

Caracterización de las fracciones de mineral obtenidas a partir del mineral arena negra

La composición química de las fracciones obtenidas mediante separación magnética (RM, M1, M2 y NM) se determinó mediante un análisis semicuantitativo de fluorescencia de rayos X (MagixPro PW-2440 Philips, sensibilidad de 200ppm (0,02%)). La estructura superficial se realizó por medio de microscopía electrónica de barrido SEM/EDX (TESCAN VEGA3 Brucker, $\pm 2,0\%$). La respuesta óptica (ancho de banda) se determinó por medio de espectroscopia UV-Vis (reflexancia difusa) con un equipo Shimadzu UV-2600 con el accesorio esfera de integración (rango de longitud de onda: 220 a 1400 nm, nivel de ruido: 0,1 %T 500 nm, 0,3 %T 900 nm, 0,1 nm) utilizando BaSO₄ como referencia

Experimentos fotocatalíticos para la producción de hidrógeno a partir de soluciones de EDTA bajo irradiación artificial UV

La actividad fotocatalítica de las fracciones obtenidas se determinó mediante la generación de hidrógeno a partir de soluciones de EDTA (agente sacrificio) bajo irradiación UV artificial. La reacción se llevó a cabo en un reactor fotoquímico de cuarzo (ACE-Glass) equipado con una lámpara de Hg que emite principalmente luz UV (70 W GE, $\lambda_{\text{max}} = 310$ nm). Inicialmente se añadió una cantidad conocida de mineral (RM, M1, M2) a 250 ml de solución de EDTA. La suspensión se transfirió al reactor y se purgó con gas N₂ (analítico grado 5,0) durante 60 min para eliminar el oxígeno disuelto. Una vez el burbujeo de N₂ se detuvo, se introdujo la lámpara UV en el interior del reactor de inmersión y se

encendió para dar inicio la fotorreacción. El proceso se llevó a cabo durante 2,0 h. La mezcla de reacción (que contuvo el mineral en suspensión) se agitó continuamente durante todo el experimento por medio de un agitador magnético (800 rpm). La temperatura de la suspensión se mantuvo a 25°C con un baño termostataado (LAUDA ±0,5 K). Los productos gaseosos generados (principalmente hidrógeno) durante el proceso fueron cuantificados mediante determinaciones in-situ con un detector de hidrógeno (Crowcon Tetra 0–2000 ppm ± 2,0%).

y NM aparecen en pequeña proporción (9,56 y 2,13%, respectivamente) en comparación con M1 siendo NM la de menor presencia en la arena negra.

Tabla 1. Porcentaje de las fracciones obtenidas a partir de la arena negra mediante la separación magnética

Fracciones	Campo magnético, (T)	Fracción magnética, (% en peso)
M1	0,0311	88,31
M2	0,1645	9,56
NM	-	2,13
RM		100

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización de las fracciones obtenidas de arena negra

La composición química de la arena negra y de las fracciones se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química de la arena negra (RM) y de las fracciones M1, M2 y NM

Elemento y/o compuesto	RM (% en peso)	M1 (% en peso)	M2 (% en peso)	NM (% en peso)
Fe ₂ O ₃	75,240	86,819	50,313	13,145
TiO ₂	14,404	4,548	37,027	10,915
SiO ₂	4,481	2,608	4,731	45,328
ZrO ₂	1,245	0,211	0,561	5,335
MnO	1,010	0,418	2,531	0,741
Al ₂ O ₃	0,941	1,041	1,399	7,566
CaO	0,829	0,742	1,015	8,203
Na ₂ O	0,462	1,162	0,491	4,069
MgO	0,411	0,470	0,704	1,708
Cl	0,304	1,139	0,548	0,779
P ₂ O ₅	0,227	0,430	0,165	0,398
V	0,175	0,188	0,281	0,094
Cr	0,121	0,059	--*	0,079
K ₂ O	0,067	0,086	0,094	--*
Nb ₂ O ₅	0,032	--*	0,073	--*
S	0,028	0,064	0,031	0,046
Zn	0,024	0,016	0,037	--*
Sr	--*	--*	--*	0,042
Y	--*	--*	--*	0,033
HfO ₂	--*	--*	--*	0,227
Ce	--*	--*	--*	0,211
La	--*	--*	--*	0,093
ThO ₂	--	--*	--*	0,037

* No detectable

Se encontró que tanto la arena negra como las fracciones están formadas por diferentes elementos y compuestos de interés fotocatalítico y que los principales compuestos de RM y las fracciones M1 y M2 son

Preparación del material semiconductor a partir del mineral arena negra con contenido de Ilmenita

La Figura 2 muestra un aspecto general de la arena negra y sus fracciones.

Figura 2. Fracciones obtenidas a partir de arena negra mediante separación magnética. (a) RM, (b) M1, (c) M2, (d) NM

Se observó que la arena negra (RM) es una mezcla irregular de granos de diferentes tamaños de partícula y morfología, así como la fracción NM la cual se caracterizó por su color amarillo. Caso contrario ocurre con las fracciones M1 y M2 las cuales presentan relativa homogeneidad con respecto al tamaño de grano sin embargo, difieren bastante en su aspecto general. La fracción M1 es de coloración negro brillante, mientras que en la fracción M2 aparecen partículas de diferente color que le dan aspecto variado.

En la Tabla 1 se muestran los porcentajes en peso de la composición de la arena negra. Se encontró que el principal componente de la arena negra (RM) corresponde a la fracción M1 (88,31%). Las fracciones M2

Fe2O3> TiO2> SiO2, mientras que para la fracción NM son SiO2>TiO2>Fe2O3, respectivamente.

Una característica importante fue la presencia del compuesto ZrO2 en todas las fracciones. Este elemento se ha utilizado como agente dopante en diferentes sistemas fotocatalíticos [11] y podría ser una ventaja desde el punto de vista fotocatalítico que se encuentra naturalmente en el material de estudio. Se encontró que la fracción M1 se presenta la mayor relación Fe2O3/TiO2, mientras que la fracción NM posee la mayor relación SiO2/TiO2. Esto supone que en la fracción M1 se encuentra el mayor contenido de ilmenita presente en la arena negra. La morfología superficial de las fracciones se presenta en la Figura 3. En general, las fracciones están compuestas por numerosos granos irregulares probablemente formados por abrasión mecánica.

Figura 3. Micrografía SEM de la arena negra y las fracciones: (a) RM (b) M1 (c) M2 (d) NM

Considerando los espectros UV-Vis/DR se estimaron los valores del ancho de banda de energía prohibida E_g (bandgap). El mecanismo de la absorción resulta de las transiciones electrónicas desde la banda de valencia a la banda de conducción atravesando el bandgap. Dependiendo del material, estas transiciones pueden ser directas o indirectas. Tanto en un caso como el otro el E_g puede ser calculado con base en la función $(h\nu (F(R))^{1/n})$ descrita por Kubelka–Munk [12]. Al graficar $(h\nu (F(R))^{1/n}$ en función de $h\nu$ (Gráfica de Tauc) se estimaron los valores del ancho de banda prohibida mediante extrapolación de la región considerada lineal hasta el eje de las abscisas. La energía del bandgap (E_g) se estimó para transiciones ópticas indirectas y directas (Figura 4).

Figura 4. Valores experimentales de E_g indirecto (a) y directo (b), obtenidos a partir del gráfico de Tauc de las fracciones.

En la Tabla 3 aparecen los valores de E_g calculados para la arena negra y cada una de las fracciones para transiciones ópticas indirectas y directas.

Tabla 3. Valores de band gaps calculados para RM y las fracciones.

Composición	RM	M1	M2	NM
Bandgap directo, eV	3,07	3,05	3,06	3,01
Bandgap indirecto , eV	3,04	3,02	3,17	3,00

Teniendo en cuenta los valores de E_g calculados experimentalmente se determinaron las longitudes de onda (λ) correspondientes utilizando la ecuación (1).

$$h\nu = E_g (eV) = 1239,84 \frac{(eV \text{ nm})}{\lambda (nm)} \tag{1}$$

Los valores correspondientes a longitudes de onda (λ) estuvieron entre 391 y 413 nm. Así, los catalizadores preparados a partir del material deben mostrar activación en el UV [13] con una ligera respuesta en la región visible.

Experimentos fotocatalíticos para la producción de hidrógeno

Efecto de la composición del semiconductor

La cantidad de hidrógeno producida aumenta con el incremento del tiempo de irradiación, sin embargo, la actividad fotocatalítica tiende a estabilizarse después de 1 hora de tratamiento. Se observó que tanto la arena negra (RM) como los concentrados magnéticos M1 y M2 presentan actividad fotocatalítica para la generación de hidrógeno, siendo M1 el que presentó la mayor productividad.

La producción de hidrógeno se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Efecto de la composición del mineral sobre la producción fotocatalítica de hidrógeno a partir de una solución 1,0 mM EDTA bajo irradiación UV artificial. 0,25 g/l mineral, pH natural (4,2).

Los niveles de producción de H₂ pudieron ser consecuencia del tipo de mineral que se probó. La caracterización de las fracciones permite observar que el material M1 tuvo la relación Fe₂O₃/TiO₂ en mayor proporción. Esta condición pudo haber mejorado la actividad fotocatalítica.

A partir de los resultados anteriores, el mineral M1 fue elegido para evaluar el efecto de las demás variables de proceso.

Efecto de la concentración del catalizador

La concentración de mineral varió desde 0,5 – 2,0 g de M1/l. La Figura 6 muestra el efecto de la concentración de mineral sobre la producción de hidrógeno

Figura 6. Efecto de la concentración de mineral sobre la producción fotocatalítica de hidrógeno. 1,0 mM EDTA y pH natural (4,2).

Se observó que la concentración de catalizador 1,0 g/l fue la que produjo mayor cantidad de H₂. Valores por encima de ésta concentración (2,0 g/l) produjeron una disminución en la productividad debida a la formación de «clusters magnéticos». Éste fenómeno disminuye el área superficial y además limita el fenómeno de transferencia de materia en el seno del fluido. Para una concentración más baja de mineral (0,5 g/l), la limitada generación del par electrón/hueco (responsables de la reducción de la solución de EDTA) repercutió en una disminución de los niveles de productividad de hidrógeno.

Efecto del pH

Con base en el punto isoeléctrico del mineral (pHPZC: 2,7), se evaluó el factor con valores por encima y por debajo del mismo. El efecto del pH sobre la producción fotocatalítica de hidrógeno se presenta en la Figura 7.

Figura 7. Efecto del pH inicial de la suspensión sobre la producción fotocatalítica de hidrógeno. 1.0 mM EDTA y 1.0 g M1/l

La mayor producción de H₂ se presentó a pH 2,0. Un aumento del pH por encima de este valor provoca una disminución en la producción. El pH de la solución afecta tanto la carga de la superficie del mineral como de la solución. En este sentido, el aumento del pH por encima del punto de cero carga (pHZPC = 2,7), carga la superficie negativamente y se presenta una repulsión electrostática entre ésta y las moléculas disociadas de EDTA. Para el caso de pH 2,0, el EDTA está parcialmente ionizado y cargado negativamente mientras que la superficie mineral está cargada positivamente. Esta situación favorece la adsorción y por ende mejora el mecanismo fotocatalítico.

Efecto concentración de EDTA. La Figura 8 muestra el efecto de la concentración de EDTA en la producción fotocatalítica de hidrógeno.

Figura 8. Efecto de la concentración de EDTA (agente sacrificio) sobre la producción fotocatalítica de hidrógeno. pH 2,0 y 1,0 g M1/l).

Con un aumento en la concentración de EDTA, la actividad fotocatalítica aumentó. Se espera que para concentraciones altas de EDTA, la producción de hidrógeno alcance un máximo, puesto que los sitios activos de la superficie del catalizador y los fotones absorbidos se mantienen constantes a una concentración constante de fotocatalizador y a una intensidad de luz fija.

CONCLUSIONES

A partir del análisis XRF se encontró que todas las fracciones presentaron mayoritariamente en su composición: Fe₂O₃, TiO₂, Al₂O₃, SiO₂ y que la fracción M1 tiene la mayor relación entre los compuestos Fe₂O₃/TiO₂ (19,2%) mientras que la fracción NM presentó mayor cantidad de SiO₂ (45,32%). Se encontró presencia de Zr y su óxido (ZrO₂) en todas las fracciones, teniendo así la ventaja que está naturalmente presente en la arena negra. Este material ha sido utilizado como agente de dopaje de fotocatalizador y pudo participar del sistema fotocatalítico mejorando la actividad para la generación de hidrógeno. Se observó que tanto la arena negra como las fracciones tienen características de absorción en el límite de UV y la región visible con valores desde 391 hasta 413 nm lo que implica que todas las fracciones pueden ser activadas bajo irradiación UV. Los valores de energía del ancho de banda para transmisiones indirectas y directas que se obtuvieron para la arena negra y las fracciones oscilaron entre 3,0 y 3,17 eV. Estos valores estuvieron acorde con los valores del gap (3,2eV) reportados en la literatura [4]. La fracción M1 obtenida a partir de la aplicación de

un campo de 0.0311T fue el fotocatalizador que tuvo la mejor actividad fotocatalítica para la producción de hidrógeno bajo irradiación de luz UV. Este resultado fue posiblemente a la relación Fe₂O₃/TiO₂ que presume un mayor contenido de ilmenita. Las condiciones en las cuales se generó la mayor cantidad de H₂ (21,05 µmoles H₂/g·h) fueron 1,0 g de M1/l del catalizador, pH 2,0 y una concentración 4,0 mM de EDTA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Rungjaroentawon, S. Onsuratoom, and S. Chavadej, "Hydrogen production from water splitting under visible light irradiation using sensitized mesoporous-assembled TiO₂ e SiO₂ mixed oxide photocatalysts," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 15, pp. 11061–11071, 2012.
- [2] H. Ahmad, S. K. Kamarudin, L. J. Minggu, and M. Kassim, "Hydrogen from photo-catalytic water splitting process : A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 599–610, 2015.
- [3] Fujishima, A.; Honda, K. , «Electrochemical photolysis of water at semiconductor electrode,» *Nature*, vol. 238, pp. 37-38, 1972.
- [4] T. Sreethawong, C. Junbua, and S. Chavadej, "Photocatalytic H₂ production from water splitting under visible light irradiation using Eosin Y-sensitized mesoporous-assembled Pt / TiO₂ nanocrystal photocatalyst," vol. 190, pp. 513–524, 2009.
- [5] A. Nada, M. Barakat, H. Hamed, N. Mohamed, and T. Veziroglu, "Studies on the photocatalytic hydrogen production using suspended modified photocatalysts," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 7, pp. 687–691, Jul. 2005.
- [6] Derbal, A.; Omeiri, S.; Bouguelia, A.; Trari, M., « Characterization of new heterosystem CuFeO₂/SnO₂ application to visible-light induced hydrogen evolution,» *Inter J Hydrogen Energy* , vol. 33, pp. 4274-4282, 2008.
- [7] Benaboud, R.;Bouvier, P.; Petit, J.P.; Wouters, Y.; Galerie, A., « Comparative study and imaging by PhotoElectroChemical techniques of oxide films thermally grown on zirconium and Zircaloy-4,» *J. Nucl. Mater.*, vol. 360, pp. 151-158, 2007.
- [8] Litter, M.I.; Navío, J.A., «Photocatalytic properties of iron-doped titania semiconductors,» *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* , vol. 98, pp. 171-181, 1996 .

[9] Liu, H.; Shon, H.K.; Sun, X.; Vigneswaran, S.; Nan, H. , «Preparation and characterization of visible light responsive Fe₂O₃–TiO₂ composites,» *Applied Surface Science*, vol. 257, pp. 5813-5819, 2011

[10] Y. Liu, T. Qi, J. Chu, Q. Tong, and Y. Zhang, "Decomposition of ilmenite by concentrated KOH solution under atmospheric pressure," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 81, no. 2, pp. 79–84, Nov. 2006.

[11] Sun W, Zhang S, Wang C, Liu Z, Mao Z. Enhanced photocatalytic hydrogen evolution over CaTi_{1-x}Zr_xO₃ composites synthesized by polymerized complex method. *Catalysis Letters*. 2007;119(1-2):148-53.

[12] KUBELKA P. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. part I. *J Opt Soc Am*. 1948 May;38(5):448-.

[13] Kudo, A., «Photocatalysis and solar hydrogen production,» *Pure Appl. Chem.*, vol. 79, n° 11, pp. 1917-1927, 2007.

[14] Yi, H.; Peng, T.; Ke, D.; Zan, L.; Yan, C., «Photocatalytic H₂ production from methanol aqueous solution over titania nanoparticles with mesostructures,» *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 672-678, 2008.

ANÁLISIS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES CONTAMINANTES DEBIDO A LA ADICION DE OXIHIDRÓGENO A LA MEZCLA CARBURANTE EN UN MOTOR DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA A GASOLINA

Duran García, Jorge Francisco ¹
Bonilla Paez, Javier Alejandro ¹
Rojas Quintero, Diego ¹
Garzón Riapira, Jhon Edison ¹

¹ Universidad ECCI, Grupo de investigación de Aprovechamiento
Tecnológico de Materiales y Energía (GIATME)

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas

RESUMEN

La investigación teórico - experimental se realizó con el propósito de diseñar una celda electrolítica para la generación de oxihidrogeno (HHO), que al añadirlo a la admisión de un motor de inyección electrónica lograra reducir el consumo de combustible y emisión de gases contaminantes, a si ayudando a mitigar los impactos ambientales producidos por el funcionamiento de los vehículos.

Mediante la electrolisis de agua se logra romper la molécula del agua debido a un flujo de corriente en un medio acuoso. al separarse las moléculas el dihidrogeno aparecerá en el cátodo y el oxígeno en el ánodo. Pero al no existir una barrera que impida que las moléculas se combinen de nuevo el resultado del proceso es oxihidrogeno. Para la construcción de la celda se implementaron procesos de manufactura, metalmecánicos y corte CNC, ya que se requirió la transformación o adecuación de materiales tales como acrílico, caucho, acero entre otros.

Palabras claves: Celda electrolítica, Gases contaminantes, Oxihidrogeno

INTRODUCCIÓN

Debido a los impactos ambientales, los altos costos y la situación energética actual donde gran parte de la energía consumida proviene de fuentes no renovables, básicamente de combustibles fósiles, además si añadimos que cada año aumenta la población mundial y por ende el consumo energético, esto provoca que estas fuentes cada día se agoten más rápidamente y dejen una huella ambiental negativa. Por eso, una de las soluciones a este problema es buscar fuentes alternas como la energía eólica, solar o el hidrógeno como combustible, donde estas fuentes son limpias e inagotables. [1] [2] [3]

Cuando hablamos de consumo de energías siempre se nos viene a la mente energía eléctrica, pero esta energía no es la única, no podemos olvidarnos de los vehículos, ya que son unos de los principales consumidores de los derivados del petróleo, contaminante y fuente no renovable de obtención de energía. Por esto, este proyecto se llevó a cabo para investigar y buscar alternativas a los motores de combustión interna, y una de estas alternativas es la tecnología del hidrógeno que posee excelentes propiedades. Por eso el objetivo de este proyecto es el diseño y construcción de un generador de oxihidrógeno, pero no en grandes cantidades sino un generador en pequeñas dimensiones y producción reducida para la aplicación en un motor con inyección electrónica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Implementos para el montaje de la Celda

Los materiales que se utilizaron para la construcción de la celda fueron seleccionados y mecanizados según el diseño y las investigaciones realizadas dentro del desarrollo del proyecto.

Láminas de acero inoxidable 304L: en la norma SAE se indica que está entre los aceros de aleación austenítica de cromo-níquel, son uno de los aceros básicos por su gran utilización en la industria. Su composición química es de 18% de cromo y 8% níquel, estos aceros son utilizados por que son fáciles de soldar, formar y tienen una gran resistencia a la corrosión. [4]

Por sus propiedades este material es el adecuado como medio conductor de la corriente, es decir estas laminas son los ánodos, cátodos y placas neutras en

cargadas de romper el enlace atómico de la molécula del agua.

Laminas y tubos de acrílico transparente: se decidió usar acrílico transparente, con el fin de ver el proceso electrolítico de forma macroscópica, además se logrará ver si existe alguna falla en las placas de acero inoxidable, los tanques son utilizados para controlar el nivel de sustancia electrolítica existente en la celda.

Racor en nilón: Este elemento se implementó como conectores entre la celda y los tanques de reserva debido a que son resistentes a la solución electrolítica, la cual es corrosiva, y no sufren corrosión por el efecto galvánico, como si lo sufriría si fueran en metales como cobre o acero. [5]

Conectores y válvulas de PVC: Estos elementos cumplen la función de permitir el llenado y vaciado de la sustancia electrolítica ya que cumple con los rangos de temperatura, presión, y diámetros necesarios, resistencia a la corrosión, además de durabilidad y bajo costo. [5]

Manguera para alimentos, transparente en PVC: Estas mangueras que son de bajo flujo, alta presión y con gran resistencia a rajaduras causadas por el medio ambiente, son utilizadas para transportar la sustancia electrolítica de los tanques de almacenamiento a la celda y también se utilizan para el transporte del oxihidrógeno hasta la admisión del motor. [6]

Arresta llamas: El arresta llamas es un elemento de seguridad necesario pues el gas de oxihidrógeno es muy explosivo y de fácil ignición, se utilizan dos arresta llamas, estos se encuentran ubicados entre el sistema de admisión y la trampa de agua, estos impiden que una llama en retroceso llegue al burbujeador.

Otros materiales: Tornillos, Tuercas, Arandelas, Abrazaderas de acero, Filtro o trampa de agua para aire, Piedra difusora de gas.

Montaje Del Sistema

Para el montaje de este generador lo primero que se debe realizar después de tener todos los materiales, es realizar un lijado manual a las placas de acero inoxidable para tener una mayor superficie de contacto con el agua. Luego se realizó un proceso de taladrado y roscado con ayuda de un machuelo de 3/8 NPT a las placas de acrílico que se compraron a la medida para así sujetar los tornillos y racores de nylon necesarios para conducir y mantener la solución electrolítica dentro del sistema. Los tornillos se deben insertar en cada

agujero y luego se coloca una manguera transparente que rodea al tornillo con el fin de aislar los tornillos con las láminas de acero. Las juntas de neopreno se utilizan como separadores entre laminas y estas fueron cortadas con bisturí. Teniendo esto listo se puede ensamblar la celda electrolítica, para esto se decidió usar una configuración de placas tanto neutras como de carga intercaladas de la siguiente manera

- Ánodo = (+)
- Cátodo = (-)
- Neutral= (n)

Otro elemento importante es el tanque que contendrá la solución electrolítica, la cual se conforma de potasa caustica (KOH) disuelta en agua pura desmineralizada en proporción de 20:1. Se fabrica con tubos y láminas de acrílico transparente con el fin de observar el nivel de la solución y la generación de oxihidrogeno. Se realizaron operaciones de corte, pegado, perforado y roscado, con el fin de obtener el tanque según el diseño propuesto, una vez realizadas las operaciones necesarias, se colocan los racores de nylon, y se les coloca en la rosca teflón, con el fin de crear un sello hermético entre las roscas. Después de tener listas estas partes se procedió a unir cada racor de la celda electrolítica, con el racor correspondiente en el tanque burbujeador, para ello se utilizó manguera transparente de PVC flexible para alimentos y abrazaderas de acero.

Funcionamiento

Con la corriente producida por el alternador, y almacenada en la batería, se alimentará todo el sistema de oxihidrogeno, incluyendo módulo de control de potencia y CCPWM, los cuales son los encargados de distribuir y controlar la corriente con la cual se alimentará el generador de oxihidrogeno, este gas será filtrado varias veces, previniendo que vapor de agua o solución electrolítica lleguen al motor afectando el funcionamiento de este.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron pruebas estáticas en el motor de un Chevrolet Aveo 1600 cc modelo 2007, las pruebas consistieron en medir el consumo de combustible en gramos de gasolina por unidad de tiempo y a la vez se realizó un análisis de gases. Con estas pruebas se verificaron los valores de los gases de escape y con-

sumo de combustible en ralentí (850 a 900 rpm) y a velocidad crucero (2500 rpm), siempre a temperatura de funcionamiento (93-97 °C).

Luego de realizar distintas pruebas experimentales evidenciadas en el documento **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN GENERADOR DE OXIHIDROGENO (HHO) PARA UN MOTOR DE INYECCION ELECTRONICA** en el que a continuación se pueden encontrar resultados de estas pruebas realizadas, y donde se puede notar la diferencia de consumo de gasolina que existe entre cada una de ellas, denotando que cuando se introdujo el oxihidrogeno en el proceso de combustión e intervino el sensor de oxígeno, se obtuvo un menor consumo de combustible que en las demás pruebas. [7]

Se realizó en cada caso una prueba en la cual se introdujo el oxihidrógeno en el proceso de combustión, pero no se intervino el sensor de oxígeno, con esto se demuestra la importancia que tiene intervenir este sensor para así obtener una verdadera disminución de consumo, puesto que, de no hacerlo, sucede lo contrario. [7]

Los otros dos tipos de pruebas se realizan para comparar el consumo de combustible del motor, en condiciones normales (sin HHO, sin intervenir sensor O2), v/s el motor trabajando con oxihidrogeno en el proceso de combustión y sensor de O2 intervenido.

Se realizaron pruebas durante 5 y 10 minutos, con el único fin de tener un rango de datos más amplio, evitando así, márgenes de error altos, y para comprobar la uniformidad y consistencia de los datos obtenidos.

Pruebas de consumo en ralentí (850-900 RPM).

Se realizaron pruebas en ralentí, para comprobar el funcionamiento del sistema y del motor, ya que es el modo en el cual se mantienen los motores de los vehículos, por ejemplo, si están en un trancón.

Figura 1. Promedio de consumo de gasolina en ralentí- 5 minutos

Con HHO, intervenido el sensor O2 en el ralenti

$$\frac{107.5 \cdot 100\%}{130} = 82,69\% - 100\% = -17,3\% \tag{1}$$

Con HHO, sin intervenir señor O2 en ralenti:

$$\frac{149.5 \cdot 100\%}{130} = 115 - 100\% = +15\% \tag{2}$$

Se evidencia que al intervenir el sensor de oxígeno y agregando HHO se lograra una reducción el consumo de gasolina. Es clave que se intervenga este sensor, ya que al no hacerlo se produciría un aumento elevado en su consumo al agregar oxihidrogeno.

Pruebas de consumo a velocidad crucero (2500 RPM).

Esta prueba es la más importante, ya que el motor de un vehículo se mantiene bajo estas revoluciones la mayor cantidad de tiempo durante su uso, debido a esto se intervino la señal del sensor de oxígeno, para que el ahorro fuera el máximo posible, a las 2500 RPM. Al igual que en las pruebas realizadas en ralenti, se observa un menor consumo con el oxihidrogeno en el proceso de combustión y el sensor de O2 intervenido.

Figura 2. Promedio de consumo de gasolina 2500 RPM-10 minutos

Con HHO, intervenido señor O2 en ralenti:

$$\frac{244 \cdot 100\%}{268,5} = 90,87\% - 100\% = -9,12\% \tag{3}$$

Con HHO, sin intervenir señor O2 en ralenti:

$$\frac{297.75 \cdot 100\%}{268,5} = 110,89 - 100\% = +10,89\% \tag{4}$$

Se puede observar de nuevo la importancia de intervenir el sensor O2, ya que cuando se introdujo el oxihidrogeno en el proceso de combustión, y no se intervino

dicho sensor, el consumo fue más elevado que en condiciones normales de funcionamiento.

Figura 3. Comparación de porcentajes de CO emitidos durante las pruebas

Análisis de emisiones durante las pruebas

Durante cada una de las pruebas de consumo realizadas se hicieron análisis de gases de escape mediante un analizador QROTECH QGA 6000 simultáneamente con el fin de obtener datos que se apropien a cada prueba.

Analizando los datos se observar cómo se elimina por completo las emisiones de CO, cuando se introduce el oxihidrogeno en el proceso de combustión y se interviene el sensor de oxígeno, con ello si tomamos los valores del análisis sin oxihidrogeno y sin intervenir el sensor de oxígeno, como el cien por ciento, debido a que es la prueba de control, se reducen las emisiones de CO en un 100%.

Hidrocarburos sin quemar

En esta figura se puede observar, que se reducen las emisiones de HC, tanto en ralenti como a 2500 RPM, comparando los datos con su respectiva contraparte.

Si se toman los valores promedio, se puede calcular el porcentaje de disminución de emisiones de HC tanto en ralenti como a velocidad crucero, así:

Figura 4. Comparación de HC emitidos durante las pruebas

Con HHO, intervenido señor O2 en ralenti:

$$\frac{33 \times 100\%}{46,25} = 71,35\% - 100\% = -28,64\% \quad (5)$$

Con HHO, intervenido sensor O2 a velocidad cruce-ro:

$$\frac{16,25 \times 100\%}{29,5} = 83,3\% - 100\% = -16,66\% \quad (6)$$

Emisiones de CO2

En la gráfica se nota una considerable disminución de emisiones de CO2 cuando se introduce el oxihidrogeno y se interviene el sensor de oxígeno, aunque solo se reducen en uno o dos puntos porcentuales, con respecto a las demás pruebas, pero si se toman los datos de los valores promedio, se podrá calcular el porcentaje de disminución y se notara la considerable disminución, así:

Con HHO, intervenido señor O2 en ralenti:

Figura 5. Comparación de CO2 emitidos durante las pruebas

Con HHO, intervenido señor O2 en ralenti:

$$\frac{12,7 \times 100\%}{14,52} = 87,46\% - 100\% = -12,53\% \quad (7)$$

Con HHO, intervenido sensor O2 a velocidad cruce-ro:

$$\frac{13,15 \times 100\%}{14,55} = 90,37\% - 100\% = -9,62\% \quad (8)$$

CONCLUSIONES

Al finalizar el proyecto se logró una reducción de 15% en el consumo de combustible en ralenti y del 8% a una velocidad cruce-ro, peor esto interviniendo el sensor de oxígeno del motor; con respecto a los gases contaminante se logró que el motor no arrojara monóxido de carbono (CO), es decir se redujo en un 100%, los hidrocarburos no quemados medidos en partículas por millón (HC) se redujeron en un 22% y por último el dióxido de carbono (CO2) bajo en promedio en un 11%. También se comprobó que la selección de materiales se realizó de una manera acertada, ya que soportan la presión y no reaccionan con la solución corrosiva que se utiliza como lo es el electrolito; el motor no se observó falla alguna debido a la implementación de este sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. K. A. K. R. H. W. Thomas B. Johansson, Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity, Washington, D.C: ISLAND PRESS, 1993.

[2] F. Posso, «Energía Y Ambiente: Pasado, Presente y Futuro.», Geoenseñansa, vol. VII, nº 2, pp. 54-73, 2006.

[3] TWENERGY, «Twenergy,» 21 Septiembre 2012. [En línea]. Available: <https://twenergy.com/a/los-gases-contaminantes-648>. [Último acceso: 17 Octubre 2016].

[4] IMPORINOX S.A.S, «Láminas de Acero Inoxidable de Alta Calidad,» IMPORINOX S.A.S, Bogotá, 2016.

[5] CODITAL FRANCE, «RACORES Y ADAPTADORES,» CODITAL FRANCE, Rognac, 2016.

[6] MANFLEX PERÚ, «Mangueras de PVC,» Lima, 2014.

[7] M. E. V. L. Jorge Francisco Duran Garcia, Diseño y Construcción De Un Generador De Oxihidrogeno (HHO) Para Un Motor De Inyección Electronica., BOGOTÁ D.C., 2014, pp. 71-86.

ILUMINACIÓN LED PARA AUTOSERVICIOS CON FUENTES DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Barbosa Urbano, Janett ¹
Mayorga Betancourt, Manuel Alejandro ¹

¹ Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME
Universidad ECCI
jbarbosau@ecci.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas: Energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y mareomotriz

RESUMEN

Se presenta un estudio técnico y económico sobre el uso de energía fotovoltaica para la iluminación con bombillos LED en dos (2) almacenes autoservicios en la ciudad de Bogotá. Los aspectos más relevantes son la radiación solar mínima sobre el área considerada y los consumos en iluminación con energía convencional. Para los dos autoservicios estudiados se determinó el consumo y costo de energía eléctrica convencional en iluminación. Se estima que, al realizar el cambio de iluminación de bombillos fluorescentes a bombillos LED y establecer como fuente primaria las baterías previamente alimentadas con energía fotovoltaica, se reduce el consumo de energía eléctrica de manera considerable en iluminación. En efecto, como conclusión se obtuvo un estimativo de ahorro del 84.32% y una recuperación de la inversión a cinco (5) años, a partir del análisis económico de tres opciones de sistemas fotovoltaicos autónomos para cada autoservicio con todos los elementos necesarios para el mejor funcionamiento.

Palabras claves: autoservicio, energía fotovoltaica, iluminación LED, panel solar, baterías.

INTRODUCCIÓN

En países en donde existe un gran potencial energético solar, el uso productivo de la energía eléctrica generada por sistemas fotovoltaicos es una alternativa tecnológica viable que podría generar un cambio significativo en la forma de vivir de sus habitantes [1]. Debido a los recientes aumentos en el precio del petróleo, la seguridad en el suministro se ha convertido en el tema más importante de la agenda política en materia de energía [2]. La energía fotovoltaica está teniendo una creciente acogida en el presente, puesto que su costo ha bajado, es asequible para las personas y su eficiencia se ha incrementado [3], por ejemplo con el uso del cloruro de magnesio, ya que se trata de un material inocuo sumamente barato [2].

También, la necesidad de asumir los retos que se presentan en materia de generación de energía ha generado un crecimiento exponencial en los últimos años de energía fotovoltaica [4]. Uno de ellos está relacionado directamente con los beneficios sociales; se prevé que a medida que se comiencen a utilizar comercialmente estas nuevas tecnologías, se crearán nuevos puestos de empleo [5], permitiendo progreso económico para los trabajadores.

Para los próximos años se espera que la generación fotovoltaica de electricidad desempeñe un papel fundamental en el cambio de modelo energético [6]. Esto último se ha hecho evidente en 2014, Alemania se ha convertido en el líder mundial en producción de energía fotovoltaica con un 36% de capacidad de generación mundial y una producción de 22 GWh [7].

Colombia ha hecho una apertura a la integración de las energías renovables, con la promulgación de la Ley No. 1715 del 13 de mayo de 2014 que “tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional” [8]. Un ejemplo son las Autopistas del Café, con la construcción de la primera planta de energía solar de 20 kW, para ofrecerle iluminación autónoma al túnel Santa Rosa vía Dosquebradas (Risaralda). Este es un modelo muy interesante, puesto que ha incrementado su atractivo para atraer inversionistas extranjeros en este campo [9], sin embargo, los logros colombianos son modestos [10], pero se demostró que con el uso del sol, en proyectos iniciales como el de Dosquebradas, se minimiza el gasto energético y se disminuye la emisión de gases efecto invernadero en nuestro país [11].

El uso de la energía fotovoltaica en iluminación para autoservicios es una aplicación poco común. Existen

casos interesantes como el del autoservicio Sika con sede en Barcelona, con 280 módulos tipo REC-260 PE Wp, una potencia de 72,80 kWp y una capacidad de producción de 103,157 kWh anuales [12].

El presente artículo muestra los resultados generales de un proyecto sobre el uso de energía fotovoltaica en autoservicios en Bogotá. El objetivo principal es el análisis económico comparativo entre el consumo actual de energía eléctrica para iluminación y tres (3) opciones para cada autoservicio de ahorro energético, reemplazando la energía convencional por paneles solares y baterías.

Los bombillos de los almacenes, permanecen en funcionamiento gran parte del día y, por lo tanto, es necesario bajar costos de consumo eléctrico. La energía eléctrica es proporcionada por CODENSA S.A. Para COOPERMERCAR se tiene un consumo promedio de 710 kWh mensual y para SERVIMERCAR el consumo promedio se encuentra en 110 kWh. Teniendo en cuenta que los precios de los paneles solares han caído más de 80% en los últimos años [13], se obtienen el consumo y el costo de la energía suministrada por CODENSA en iluminación y se proponen tres (3) opciones de sistemas fotovoltaicos para cada autoservicio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el análisis de consumo de energía eléctrica para iluminación y los costos en cada autoservicio y se obtuvieron los promedios mensuales y anuales. Se propusieron sistemas fotovoltaicos autónomos que se componen de módulos fotovoltaicos, regulador, baterías y una estructura de instalación. Estos materiales fueron calculados con el siguiente método:

Cálculo del número de módulos fotovoltaicos

Determinación del mes de menor radiación solar, para este caso es noviembre con una radiación de 3447,8kW/m².

Se calcula la cantidad de watts pico con la siguiente ecuación (1):

$$Wp = 1200 \times \frac{EP}{RD} \quad (1)$$

Donde:

Wp = Watts pico.

ED = energía consumida por día en kW.
RD = menor radiación mensual en el año de la zona en kW/m².

Se selecciona la potencia del panel que se va a usar y se determina el número de módulos necesarios para el sistema, con la ecuación (2):

$$Np: \frac{Wp}{Pp \times 1.1} \tag{2}$$

Donde:
Np: número de paneles
Wp: Watts pico
Pp: potencia del módulo elegido dada por el fabricante.

Determinación del regulador

Este aparato debe ser capaz de soportar una potencia efectiva, como mínimo, la potencia máxima del campo de panales incrementada 10%. Se utilizó la siguiente ecuación (3):

$$Nr = \frac{Npp \times (Imp \times (1,1))}{Ir} \tag{3}$$

Donde:
Nr: Número de reguladores.
Npp: Número de módulos conectados en paralelo
Imp: Intensidad en el punto de potencia máxima (característica eléctrica del módulo fotovoltaico).
Ir: Intensidad máxima del regulador.

Selección del acumulador o batería

Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:
Número máximo de días de autonomía (sin recibir radiación solar).
Profundidad de descarga máxima de la batería.
Perdidas por rendimiento del acumulador
Tensión de trabajo de la instalación.

Con la anterior información se utiliza la siguiente ecuación (4):

$$C = \frac{ET \times D \times 100}{Pd \times V} \tag{4}$$

Donde:
C: Capacidad del acumulador
ET: Energía total de la instalación, (W.h)/día
D: Números de días de autonomía, días.
Pd: Profundidad máxima de descarga del sistema acumulador, %.
V: Tensión del sistema de acumulación, voltio.

Selección de la estructura

La estructura seleccionada para la instalación fotovoltaica en los dos autoservicios se muestra en la siguiente Figura 1: Estructura para soporte de los módulos fotovoltaicos.

Figura 1. Estructura para soporte de los módulos fotovoltaicos

Se tuvieron en cuenta las características físicas de los paneles, en este caso, se utilizarán paneles solares de marca Qpeak de origen alemán, con un peso de 19,8 kg y dimensiones de 1000 mm x 17000 mm, policristalinos. La estructura es de fácil manejo y adecuación en áreas específicas.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para los dos autoservicios estudiados se determinó el consumo y costo de energía eléctrica convencional en iluminación y se propusieron tres (3) opciones de diseño de sistemas fotovoltaicos autónomos para alimentar la iluminación de cada uno de los autoservicios. Se evaluaron cada una de estas propuestas eligiendo la más atractiva en términos económicos.

Al realizar un análisis de consumo de energía eléctrica y costos, se determinó que el autoservicio COOPERMERCAR consume un promedio anual de 8106 kWh con un costo de \$2.667.961,04 pesos. Ver Tabla 1 Consumo de energía y costos para COOPERMERCAR.

Tabla 1 Consumo de energía y costos para COOPERMERCAR

	CONSUMO DIARIO (kWh/día)	CONSUMO MENSUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (kWh)
	22,519	675,57	8106,84
COSTO	\$7.411,00	\$222.330,09	\$2.667.961,04
	Valor kilo vatio \$329,1 el cual se multiplica por el consumo diario.	El consumo mensual se multiplica el consumo diario por 30 días del mes.	El consumo anual se multiplica el consumo mensual por 12 meses del año.

Para SERVIMERCAR se obtuvo un consumo promedio anual de 3034.80 kWh con un costo anual de \$998.752.68 pesos. Ver Tabla 2 Consumo de energía y costos para SERVIMERCAR.

Tabla 2 Consumo de energía y costos para SERVIMERCAR

	CONSUMO DIARIO (kWh/día)	CONSUMO MENSUAL (kWh)	CONSUMO ANUAL (kWh)
	8,43	252,9	3034,80
COSTO	\$2.774,31	\$83.229,39	\$998.752,68
	Valor kilo vatio \$329,1 el cual se multiplica por el consumo diario.	el consumo mensual se multiplica el consumo diario por 30 días del mes.	el consumo anual se multiplica el consumo mensual por 12 meses del

Se presentan las opciones para cada autoservicio con el análisis de los resultados:

Opciones para COOPERMERCAR

Se proponen tres (3) opciones de bombillos LED y sus respectivos consumos y se escoge la opción de menor consumo para calcular el sistema fotovoltaico de respaldo energético. Ver Figura 2 Comparación entre consumos de energía de los bombillos LED para COOPERMERCAR.

Figura 2. Comparación entre consumos de energía de los bombillos LED para COOPERMERCAR

Con el cambio de luminaria fluorescente a LED se logra un ahorro en energía eléctrica considerable (Opción 3) para COOPERMERCAR. También se registran ahorros en el consumo de energía hasta un 90 por ciento con led [18], que es mucho mayor a la tecnología fluorescente, superándola por más de 5 veces, por ejemplo, un bombillo fluorescente de 25 W se puede reemplazar por un bombillo LED de 5 W, manteniendo las mismas características de eficiencia lumínica.

La opción 3 para el autoservicio COOPERMERCAR, se plantea como la mejor, se reduciría el consumo y costo en un 84,32%. En la Tabla 3 Costos de instalación para autoservicio COOPERMERCAR, se muestran los elementos y costos del sistema fotovoltaico. Esta opción tiene una recuperación de 4 años. Al año se paga en facturas \$ 3.010.271,04 pesos a la empresa CODENSA S.A en iluminación lo que genera esta recuperación.

Tabla 3 Costos de instalación para autoservicio COOPERMERCAR

ELEMENTOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Panel policristalino Q PEAK	6	\$ 600.000,00	\$ 3.600.000,00
Acumulador MT122550 (12 V 255 Ah)	10	\$ 256.250,00	\$ 2.562.500,00
Controlador BlueSolar charge controller	1	\$ 708.357,42	\$ 708.357,42
Regulador Victron Phoenix solar 48 V 3000 W	1	\$ 3.015.850,42	\$ 3.015.850,42
Tubos LED 38 W/2400 mm	9	\$ 35.000,00	\$ 315.000,00
Bombillos LEDE27	9	\$ 38.000,00	\$ 342.000,00
balastros tubos LED	9	\$ 13.000,00	\$ 117.000,00
TOTAL			\$ 10.660.707,84

Los módulos tienen una intensidad aproximada de 8.41 A y la intensidad con la que trabaja el regulador es de 70 A. Sólo es necesario un regulador. Las baterías tienen 3 días autonomía [24]; se recomienda una capacidad de 443.34 Ah, por lo tanto, se necesita instalar un grupo de 10 baterías con esta capacidad. Siete (7) acumuladores conectados en paralelo y los restantes en serie, cuya conexión determina 48 V y 490A.

Opciones para SEVIMERCAR

Para el autoservicio SERVIMERCAR, se presentan también tres opciones de las cuales se escoge la que más reduzca el costo y consumo sin sacrificar los luxes. Con la luminaria LED se tiene una mejor iluminación puesto que la eficiencia lumínica del bombillo es superior, el 22% [4] frente a un 14% [5] de la iluminación fluorescente. A continuación se presentan las opciones. Ver Figura 3 Comparación entre consumos de energía de los bombillos LED para SERVIMERCAR [8].

Figura 3 Comparación entre consumos de energía de los bombillos LED para SERVIMERCAR

Si bien las opciones planteadas en la Figura 3 minimizan el costo y consumo, no obstante la opción 1 que se sugiere es la más adecuada.

Se utilizó el mismo método para proponer la opción de instalación fotovoltaica para el autoservicio SERVIMERCAR [22]. Para el número de los módulos fotovoltaicos se establece la potencia pico; la menor radiación en el año corresponde a noviembre, con un valor de 3447.8 Wh/m² y la energía total de la instalación de 2542.05 Wh/día. Se obtiene el dato de 804.51 Wh. Luego se calcula la potencia máxima del panel necesaria y se obtiene 250 Wp, por lo tanto, se necesitan 3 módulos fotovoltaicos [19].

La intensidad es de 8.41A con la que trabaja el regulador de 70 A, que es la misma que para la opción de COOPERMERCAR. También se requiere tan sólo de un (1) regulador [19]. Para establecer el total de las baterías se utiliza la energía total de la instalación; los días de autonomía que se recomiendan es de 3 días [24]. La capacidad necesaria es de 397.19 Ah, lo que significa que se deben instalar un total de 5 baterías, 4 conectadas en paralelo, lo que puede garantizar 24 V y 400 A [19]. La Tabla 4 muestra el costo de la instalación para el autoservicio SERVIMERCAR [19].

Tabla 4 Costo de instalación para autoservicio SERVIMERCAR

ELEMENTOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Panel policristalino Q PEAK	3	\$600.000,00	\$1.800.000,00
Acumulador MT122550(12V100Ah)	5	\$256.250,00	\$1.281.250,00
Controlador BlueSolar charge controller	1	\$708.357,42	\$708.357,42
inversor PST-150S-12A_24	1	\$966.000,00	\$966.000,00
Tubos LED 18W/1200mm	10	\$35.000,00	\$350.000,00
Bombillos LED E27	1	\$38.000,00	\$38.000,00
balastros tubos LED	10	\$13.000,00	\$130.000,00
Cableado	2	50000	\$100.000,00
Estructura	1	\$ 250.000	\$250.000,00
Conectores	30	\$ 1.500	\$45.000,00
TOTAL			\$5.273.607,42

La opción escogida para SERVIMERCAR consta básicamente de tres (3) módulos solares, cinco (5) baterías o acumuladores, un (1) regulador y un (1) inversor. Con esta solución, puede generarse un ahorro mensual en el uso de energía eléctrica convencional equivalente a \$83.229.39 pesos, con una inversión de \$5.273.607 de pesos, lo que indica que en menos de 5 años se recupera la inversión, sacrificando levemente la capacidad lumínica y teniendo en cuenta que es un sistema con una durabilidad mayor a 20 años [19].

CONCLUSIONES

La iluminación LED para los autoservicios COOPERMERCAR y SERVIMERCAR, puede significar un gran ahorro de energía eléctrica convencional con una disminución hasta del 84,32%, según las cifras obtenidas. La inversión para cada opción, tiene un estimado de recuperación en un mediano plazo de cinco (5) años. De igual manera, el cambio de bombillos fluorescentes a LED, puede generar una mayor eficiencia energética (del 14% al 22%), así como mejores condiciones de salubridad pública en los establecimientos puesto que los bombillos LED son mucho menos peligrosos para la salud humana, comparados con los fluorescentes, cuya composición lleva de 20 a 25 mg de mercurio (Hg) que es tóxico para los seres vivos. Finalmente, este tipo de estudios aportan información que puede llegar a ser muy útil para futuras implementaciones en ambientes comerciales y condiciones climáticas como las de Bogotá.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. Valer Morales y R. Zilles, «Utilización de la energía fotovoltaica en pequeñas actividades productivas en zonas rurales,» de IV Conferencia Lation Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII-SPES), Cusco, Perú, 2010.

[2] Greenpeace, «Revolución energética. Perspectiva mundial de la energía renovable,» 2007. [En línea]. Available: http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/cambio_climatico/r-evoluci-n-energetica-persp.pdf. [Último acceso: 10 Mayo 2014].

[3] I. Chávez, «Desarrollo mundial de la energía solar fotovoltaica,» La Habana, 2010.

[4] SUELO SOLAR, «Situación actual de la energía solar fotovoltaica en el mundo según el Plan de Energías Renovables PER 2011-2020,» 2014. [En línea].

Available: <http://www.suelosolar.es/newsolares/new-sol.asp?id=6209>. [Último acceso: 19 04 2014].

[5] U.S Department of Energy, «Las tecnologías de energía verde crean trabajos verdes,» Octubre 2010. [En línea]. Available: http://www1.eere.energy.gov/library/pdfs/corporate_green_jobs_fs_spanish.pdf. [Último acceso: Abril 2014].

[6] B. Müller, «El futuro de la energía solar,» *Investigación y ciencia. Edición española de Cientific American*, n° 428, Mayo 2012.

[7] J. A. Roca, «El periódico de la energía.com,» 26 agosto 2014. [En línea]. Available: <http://elperiodico-delaenergia.com/nuevo-record-aleman-en-la-produccion-de-energia-fotovoltaica/>. [Último acceso: 27 noviembre 2014].

[8] Congreso de Colombia, «Ley No. 1715 Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional,» 13 mayo 2014. [En línea]. Available: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY%201715%20DEL%2013%20DE%20MAYO%20DE%202014.pdf>. [Último acceso: 15 junio 2014].

[9] Portafolio.co, «Energías renovables, el nuevo foco de inversión en Colombia,» 15 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.portafolio.co/economia/energias-renovables-el-nuevo-foco-inversion-colombia>.

[10] H. Rodríguez Murcia, «Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas,» *Revista de Ingeniería de la Universidad de Los Andes*, n° 28, pp. 83-89, noviembre 2008.

[11] ALTA INGENIERÍA XXI, «ALTA INGENIERÍA XXI,» 2014. [En línea]. Available: http://www.altaingenieriaxxi.com/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=63. [Último acceso: 16 03 2014].

[12] «Una cadena alemana de autoservicios apuesta por el cambio de modelo energético con una instalación de autoconsumo en su cubierta,» [En línea]. Available: notiweb.com. [Último acceso: 26 05 2014].

[13] K. Bullis, «MIT Technology Review,» 16 junio 2014. [En línea]. Available: http://www.technologyreview.es/read_article.aspx?id=45473. [Último acceso: 20 agosto 2014].

[14] M. Ortega Rodríguez, Energías Renovables, Madrid: Paraninfo, 2000.

[15] Congreso de la República de Colombia, *Ley 697 de octubre 3 de 2001*, Bogotá: Congreso de la República de Colombia, 2001.

[16] «ENERGIZA,» [En línea]. Available: <http://www.energiza.org/solar-fotovoltaica/22-solar-fotovoltaica/712-el-grupo-de-investigacion-y-desarrollo-en-energia-solar-idea-de-la-universidad-de-jaen-diseña-unas-estructuras-fotovoltaicas-con-un-grado-de-eficiencia-del-43>. [Último acceso: 26 04 2014].

[17] P. S. N. R. DANIEL FELIPE MONTENEGRO CORRAL, IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA DESDE UN PANEL DE CELDAS SOLARES A UNA RED ELECTRICA RESIDENCIAL, BOGOTÁ, 2012.

[18] «Sustentabilidad: un tema que nos concierne a todos,» *spanic newspaper serving the community*, 2014.

[19] D. M. G. R. Wilmar Giovani Santamaría Sáenz, ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO SOBRE EL USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA ILUMINACIÓN EN DOS AUTOSERVICIOS, BOGOTÁ, 2014.

[20] IDEAM, «RADIACIÓN MENSUAL AÑOS 2005 A 2012,» BOGOTÁ, 2014.

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE GAS OXIHIDRÓGENO (HHO) EN LA MEZCLA AIRE/COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Barco Burgos Jimmy¹
Duran García, Jorge²
Mago Ramos, María Gabriela³

¹ Universidad ECCI, Grupo de investigación GIATME
² Universidad ECCI, Estudiante Ingeniería Mecánica
³ Universidad LIBRE, Grupo de investigación DETECAL
jbarcob@ecc.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas

RESUMEN

Frente a la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles y disminuir las emisiones generadas en los motores de combustión interna, la comunidad científica ha venido trabajando en combustibles alternativos de bajas emisiones. El hidrógeno es uno de estos combustibles alternativos promisorios. En este trabajo experimental se evaluó el efecto de la adición de gas oxihidrógeno en la mezcla aire/combustible en un motor Chevrolet Aveo 1600cc. Se evaluó la influencia de la variación en la corriente que se suministra a la celda de generación y la variación en la señal de intervención del sensor de oxígeno en el consumo de combustible y emisiones. El rendimiento del motor fue evaluado con la mezcla gasolina+HHO a 8A- 0mV, gasolina+HHO a 15A- 0 mV, gasolina+HHO a 8A- 100 mV y gasolina+HHO a 8A- 200 mV. Los resultados de las pruebas indican que la mezcla de gasolina y oxihidrógeno conducen a una reducción promedio del 36% en el consumo de combustible, un 0% en la concentración del monóxido de carbono 100% en la reducción de hidrocarburos pesados y un 52% en la concentración de dióxido de carbono .

Palabras claves: Gas HHO, motor de combustión, electrólisis, gasolina, emisiones.

INTRODUCCIÓN

El transporte es una de las problemáticas más importantes en las zonas urbanas alrededor del mundo [1]. El aumento del costo de combustible, la contaminación ambiental y la congestión en carreteras son algunas de las preocupaciones que han llevado a la necesidad de considerar formas alternativas de transporte y la búsqueda de tecnologías alternas que permitan disminuir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de los motores de combustión interna. Esta problemática ha motivado a investigadores a buscar soluciones que no requieran drásticas modificaciones en el diseño de los motores y que no generen impactos negativo en el rendimiento y los costos de manufactura [2].

Entre las diferentes soluciones, está el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno (que garantiza un aumento en la eficiencia en el motor y la generación de vapor de agua como único subproducto de la combustión [1][3][4]. Aunque este tipo de tecnologías es madura, desde el punto de vista comercial no es posible implementar, ya que la construcción de un sistema generador de hidrógeno, integrado al sistema del motor y los elevados costos de manufactura genera un impacto desfavorable en el precio final del vehículo [5]. A pesar de esto, Para evitar los problemas de almacenamiento, recarga y elevados costos de generación de combustible de hidrógeno, una de las tecnologías más económicas es la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno como único combustible o como combustible complementario para su uso en motores de combustión interna [6] hydroxy gas (HHO).

Varios autores han trabajado con la electrólisis del agua para la generación de una mezcla de gas de hidrógeno y oxígeno (oxihidrógeno) que mezclado con gasolina logra una reducción en las emisiones y consumo de combustible [7]. Musmar et al. Diseñaron, integraron y probaron un dispositivo compacto generador de oxihidrógeno en un motor a gasolina. Los resultados mostraron una reducción del 50% del óxido de nitrógeno (), un 20% del monóxido de carbono (y un 30% en el consumo de combustible con la adición del gas de oxihidrógeno [8]constructed, integrated and tested on a gasoline engine. Test experiments were conducted on a 197cc (Honda G 200.

La Universidad Tecnológica de Rangasamy en India caracterizó el rendimiento de un mono cilindro a varias velocidades, funcionando con la mezcla dual gasolina y oxihidrógeno, para evitar los problemas de

almacenamiento y recarga del combustible, se utilizó la electrólisis del agua para producir el hidrógeno, su trabajo reporta una reducción del 9,5% en consumo de combustible, una reducción del 27,5% en la concentración de monóxido de carbono y una reducción de 25,5 % en la concentración del oxido de nitrógeno () [7]. El presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la adición del gas oxihidrógeno en el consumo de combustible y emisiones generadas en un motor de combustión interna.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo experimental, las pruebas se han ejecutado con el fin de determinar el rendimiento en consumo de combustible y porcentaje de emisiones generadas en un motor de combustión interna de inyección electrónica operado con gasolina y oxihidrógeno. Los detalles del motor, propiedades de los combustibles, celda de generación de oxihidrógeno, tanque de almacenamiento de combustible y unidad de control se discuten a continuación.

Especificaciones del motor

En la Tabla 1 se muestran las especificaciones del motor Chevrolet Aveo 1600cc usado en la ejecución experimental

Tabla 1. Especificaciones del motor [5]

Marca	Chevrolet Aveo
Tipo	4CIL DOHC 16V
Torque kg-m (Nm) @rpm	14,7 (144.1) @ 3600
Potencia (HP @rpm)	103 @ 6000
Sistema de encendido	Eléctrico
Bomba de gasolina	Eléctrica
Desplazamiento (cc)	1,598
Diámetro x carrera (mm)	79 x 81,5
Numero de cilindros	4 en línea
Numero de válvulas	16
Posición	Transversal
Relación de compresión	9,5:1
Relación de giro	4,89/5,12

Propiedades del combustible

En la Tabla 2 se muestran las propiedades de la gasolina y el hidrógeno.

Tabla 2. *Propiedades del combustible* [3]

Propiedad	Gasolina	Hidrógeno
Estructura química		
Poder calorífico inferior ()	43	120
Poder calorífico superior ()	47	142
Numero de octanos	84-93	130
Punto de inflamabilidad (°C)	-43	-
Temperatura de ignición (°C)	257	566-582
Densidad (	803	0,082
Límites de inflamabilidad en aire (% vol.)	1,2-7,1	4-75

Celda de combustible

En la Figura 1 se muestra la celda de generación de oxihidrógeno usada en la ejecución experimental. La celda está fabricada en láminas de acero inoxidable 304L, placas de acrílico y empaques de neopreno que unidos con tornillos y tuercas de ¼” garantizan la hermeticidad necesaria para la generación de la solución electrolítica. La celda tiene acoplados dos tanques contenedores que funcionan como burbujeador primario de la solución electrolítica generada, conectados por medio de racores en nilón de rosca 3/8”, espigas de pescado de 1/4” y manguera reforzada de PVC a un tercer tanque en acrílico que sirve como burbujeador secundario y filtro de gas. Conectado por medio de mangueras reforzadas de PVC se instala una trampa de agua y dos arrestadores de llamas en tubo de acero para proteger el sistema del agua y de posibles explosiones generadas por el gas combustible que se conduce al sistema de admisión del motor.

Figura 1. *Celda de combustible*

Tanque de almacenamiento de combustible

En la Figura 2 se muestra el tanque de combustible usado para almacenar la gasolina, fabricado en lámi-

na de acrílico de 20x25x1 cm con un volumen de 12,5 litros.

Figura 2. *Tanque de combustible*

Unidad de control

En la Figura 3 se muestra el circuito usado para la intervención del sensor de oxígeno, este circuito utiliza una batería de 1,5 voltios, un switch on/off, un conjunto de resistencias y un potenciómetro que fijan la señal que será enviada por el sensor a la unidad de control del motor (ECU), con el fin de indicarle una condición tal que se mantenga un suministro mínimo de gasolina.

Figura 3. *Circuito intervención sensor de oxígeno*

La unidad de control está equipada con un regulador de ancho de pulso de corriente constante (CCPWM), circuito utilizado para controlar los impulsos de corriente eléctrica que fluyen a través de la celda de oxihidrógeno que permiten regular el flujo de modo que se produzca oxihidrógeno de forma más eficiente. Asimismo se integra un tablero de control que permite accionar interruptores y potenciómetros para definir cantidad de corriente con la que se alimenta la celda de generación y señal enviada al sensor de oxígeno.

En la Figura 4 se muestra el esquema del montaje experimental usado. El gas oxihidrógeno es generado por medio del proceso de electrólisis en una celda hú-

meda. El gas es contabilizado por un caudalímetro y es mezclado con aire fresco antes de ingresar a la cámara de combustión. La prueba se lleva a cabo con el fin de evaluar el rendimiento del motor operando en una condición de carga constante, velocidad variable (800- 2600 rpm), funcionando solo con gasolina y con la mezcla dual gasolina-oxihidrógeno. Las lecturas de consumo de combustible se registran cada minuto en una balanza digital y los gases de escape son procesados por un analizador de gases capaz de identificar y determinar el porcentaje en volumen (% vol.) de hidrocarburos pesados (, monóxido de carbono (, dióxido de carbono , oxido nitroso y oxigeno . Un escáner automotriz es utilizado para registrar rpm, temperatura del carter del motor, señal sensor de oxigeno y relación aire combustible. Cada prueba experimental fue repetida en tres ocasiones y los resultados obtenidos se promediaron para poder construir las figuras de rendimiento en consumo de combustible y emisiones generadas.

Figura 4. Esquema ejecución experimental

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Rendimiento

La Figura 5 y 6 se muestra el efecto de introducir gas oxihidrógeno en la cámara de combustión sobre el consumo de combustible a diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina y con la mezcla dual gasolina-oxihidrógeno a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda (8 y 15 amperios) e intervención del sensor de oxigeno (0, 100 y 200 mV).

En la Figura 5 la mezcla gasolina+HHO a 8A- 0 mV reduce el consumo de combustible en un 18% a bajas

revoluciones (800rpm) y en un 26 % a altas revoluciones (2500 rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. Para la mezcla gasolina+HHO a 15A- 0mV la reducción a bajas revoluciones (800 rpm) es de un 36% y de un 30% a altas revoluciones (2500rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. Resultados similares se han obtenido usando la mezcla dual gasolina y oxihidrógeno, reducciones del 10,30 y 34 % en consumo de combustible fueron alcanzadas en un mono cilindro de 150 cc, en un motor a gasolina de 197 cc y 1300 cc usando una celda de combustible [1][5][7]. La reducción en el consumo de combustible indica que el gas oxihidrógeno mejora el proceso de combustión mediante el aumento de la eficiencia térmica del motor y la reducción del consumo de combustible. Puesto que al comparar el gas oxihidrógeno con la gasolina comercial, el gas oxihidrógeno es mucho más eficiente en términos de la estructura química del combustible. El hidrógeno y el oxígeno presentes en el gas oxihidrógeno existen como dos átomos por unidad de combustible como grupos independientes que facilita la interacción con la chispa de encendido y la compresión de la mezcla combustible/aire + HHO en comparación con las miles de largas moléculas de hidrocarburos de las que se compone la gasolina [1].

Figura 5. Efecto de gas oxihidrógeno en consumo de combustible sin intervenir sensor de oxígeno

En la Figura 6 la mezcla gasolina+HHO a 8A- 100mV reduce el consumo de combustible en un 0% a bajas revoluciones (800 rpm) y en un 18% a altas revoluciones (2500rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. Para la mezcla gasolina+HHO a 8A- 200 mV la reducción a bajas revoluciones (800rpm) es del 18% y de un 11% a altas revoluciones (2500rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a ga-

solina. Estos resultados indican un mayor efecto de la variación de la corriente que se suministra en la celda de generación en el consumo de combustible que la variación de la señal enviada al sensor de oxígeno.

Una mayor corriente generará mayor cantidad de oxihidrógeno, este gas al hacer combustión libera la energía necesaria para facilitar la ruptura de los enlaces moleculares de la gasolina y por lo tanto se aumenta la velocidad de reacción, velocidad de llama y un aumento en la eficiencia de la combustión. Asimismo la introducción del gas oxihidrógeno a la mezcla de combustible/aire tiene un impacto positivo en el índice de octano del combustible. Por lo tanto la relación de compresión del motor se puede incrementar y la eficiencia del motor aumenta. Es así que a mayor cantidad de oxihidrógeno presente en la mezcla mayor eficiencia y menor consumo de combustible.

Figura 6. Efecto de gas oxihidrógeno en consumo de combustible con intervención de sensor de oxígeno

Emisiones

En la figura 7 se muestra el efecto de la adición del gas oxihidrógeno en la mezcla aire/combustible sobre la concentración de monóxido de carbono para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina y con la mezcla dual gasolina-oxihidrógeno a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda (8 y 15 amperios) e intervención del sensor de oxígeno (0, 100 y 200 mV). La mezcla gasolina+HHO a 8A- 0 mV y gasolina+HHO a 15A- 0 mV no presenta cambios significativos en la concentración del monóxido de carbono para bajas y altas revoluciones (800 y 2500 rpm).

En la figura 8 se muestra el efecto de la adición del gas oxihidrógeno en la mezcla aire/combustible sobre la concentración de los hidrocarburos pesados para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina y con la mezcla dual gasolina-oxihidrógeno a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda (8 y 15 amperios) e intervención del sensor de oxígeno (0, 100 y 200 mV). La mezcla gasolina+HHO a 8A- 0 mV reduce en un 100% la concentración de hidrocarburos pesados para bajas velocidades (800rpm) y en un 97% para altas velocidades (2500rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. La mezcla gasolina+HHO a 15A- 0 mV reduce en un 98% la concentración de hidrocarburos pesados para bajas velocidades (800rpm) y en un 100% para altas velocidades (2500 rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. Una de las principales causas de reducción de las emisiones de se debe al alto porcentaje de presente en el gas de HHO que se inyecta en el colector de admisión, lo que mejora el proceso de oxidación del combustible y reduce las emisiones de Estos resultados experimentales coinciden con estudios similares realizados por [1][5][6][7], en donde las emisiones de fueron bajas en comparación con el funcionamiento solo a gasolina, debido a la presencia de en el gas oxihidrógeno usado.

En la figura 9 se muestra el efecto de la adición del gas oxihidrógeno en la mezcla aire/combustible sobre la concentración del dióxido de carbono para diferentes velocidades cuando el motor es operado solo a gasolina y con la mezcla dual gasolina-oxihidrógeno a diferentes condiciones de corriente de alimentación de la celda (8 y 15 amperios) e intervención del sensor de oxígeno (0, 100 y 200 mV). La mezcla gasolina+HHO a 8A- 0 mV aumenta en un 2% la concentración de dióxido de carbono para bajas velocidades (800rpm) y reduce en un 47% para altas velocidades (2500rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. La mezcla gasolina+HHO a 15A- 0 mV reduce en un 52% la concentración de dióxido de carbono para bajas velocidades (800rpm) y en un 100% para altas velocidades (2500rpm) cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. Una de las principales causas de reducción es la falta de carbono en el hidrógeno puro o en el gas oxihidrógeno. Estos resultados experimentales coinciden con estudios similares realizados por [1][5][6][7], en donde las emisiones de fueron bajas en comparación con el funcionamiento solo a gasolina, debido a la ausencia de carbono en el gas oxihidrógeno usado.

Figura 7. Cambio en concentración de monóxido de carbono

Figura 8. Cambio en concentración de hidrocarburos pesados

Figura 9. Cambio en concentración de dióxido de carbono

CONCLUSIONES

Se evaluó el efecto de la adición de gas oxihidrógeno (HHO) en la mezcla aire/combustible en un motor de combustión interna, la celda de oxihidrógeno se pudo integrar exitosamente con el motor existente. Los resultados experimentales muestran que la adición de gas oxihidrógeno en la mezcla aire/combustible en un motor Chevrolet Aveo 1600cc genera una reducción en el consumo de combustible del 36% a bajas revo-

luciones (800 rpm) y de un 30 % a altas revoluciones (2500rpm) resultados similares a los reportados en la literatura [5][6][7][8]. Se obtuvo mayor disminución en el consumo de combustible con la variación de la corriente que se suministra a la celda de generación que al variar la señal de intervención del sensor de oxígeno. La concentración de hidrocarburos pesados se redujo en un 100% a bajas velocidades (800rpm) para mezclas de gasolina+HHO a 8A- 0mV y altas velocidades (2500rpm) para mezclas de gasolina+HHO a 15A- 0mV cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina. La concentración de dióxido de carbono se redujo en un 52% para bajas velocidades (800rpm) y de 100% para altas velocidades para mezclas de gasolina+HHO a 15 A- 0mV cuando se compara con el funcionamiento solo a gasolina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. M. El-Kassaby, Y. A. Eldrainy, M. E. Khidr, and K. I. Khidr, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions," *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 243–251, 2016.
- [2] P. Chaiwongsa, N. Pornsuwancharoen, and P. P. Yupapin, "Effective hydrogen generator testing for on-site small engine," *Phys. Procedia*, vol. 2, no. 1, pp. 93–100, 2009.
- [3] J. A. Caton, "Implications of fuel selection for an SI engine: Results from the first and second laws of thermodynamics," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3157–3166, 2010.
- [4] M. B. King, "Water electrolyzers and the zero-point energy," *Phys. Procedia*, vol. 20, pp. 435–445, 2011.
- [5] S. A. Musmar and A. A. Al-Rousan, "Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines," *Fuel*, vol. 90, no. 10, pp. 3066–3070, 2011.
- [6] A. C. Yilmaz, E. Uludamar, and K. Aydin, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11366–11372, 2010.
- [7] T. Rajasekaran, K. Duraiswamy, M. Bharathiraja, and S. Poovaragavan, "Characteristics of engine at various speed conditions by mixing of HHO with gasoline and LPG," *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 46–51, 2015.
- [8] A. A. Al-Rousan, "Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 23, pp. 12930–12935, 2010.

CONSTRUCCIÓN DE UN RESERVORIO PARA EL ALMACENAMIENTO DE BIOGAS GENERADO POR UN BIODIGESTOR

Sotomonte Lina¹
Rodríguez Laura¹
Díaz Orlando¹
Vargas José¹
Ávila Andrés¹
Casabianca Luis Miguel¹

¹ Universidad El Bosque
casabiancaluis@unbosque.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas: Energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y mareomotriz

RESUMEN

La ejecución del proyecto se llevó a cabo en la hacienda la Cosmopolitana se destaca por ser un centro agroecológico que cuenta con un biodigestor de flujo continuo alimentado por los excrementos de las marraneras y de los establos. Este biodigestor no se encuentra en etapa productiva además, no cuenta con un reservorio para la producción del mismo, lo que ocasiona una falta de aprovechamiento de este biogás. Tras el diseño y construcción un sistema de almacenamiento que permite el aprovechamiento de este gas, este puede ser utilizado en diferentes procesos productivos dentro de la hacienda, ya que el biodigestor tiene una producción aproximada de 3200L diarios que están siendo desperdiciados. La metodología del trabajo se basó en 3 pasos principales: Visitas y reconocimiento del estado inicial del sistema; cuantificación de la producción y construcción del reservorio; adaptación del reservorio al biodigestor. El reservorio construido, era un reservorio cilíndrico de 60cm de altura, 30cm de diámetro, teniendo un volumen total de 42411.5cm³. El cual cumple con la función de almacenar biogás generado por el biodigestor aunque no tiene una tasa considerable respecto a la producción diaria del biodigestor pero abastece para una estufa de cuatro puestos, y de esta manera su diseño permite que sea transportado el biogás a diferentes lugares de la hacienda para su aprovechamiento energético.

Palabras claves: Biodigestor, Biogás, Energía Alternativa, Reservorio

INTRODUCCIÓN

La hacienda la Cosmopolitana es un centro agro-ecológico ubicado en la vereda la Floresta, municipio de Restrepo-Meta. Esta cuenta con un biodigestor de flujo continuo el cual es proyecto de generación de energía a través del material orgánico producido por las actividades de la Hacienda. Con el fin de generar un modelo de producción agropecuaria, energética, ambiental y económica sostenible.

El biodigestor de la hacienda la Cosmopolitana es alimentado por los excrementos de las marraneras y de los establos del ganado bovino, lo que proporciona un flujo constante al sistema de producción de biogás. El sistema de biodigestor no está en una etapa de producción ya que cuenta con fallas de diseño y de cuantificación a la hora de estimar con exactitud la producción del mismo. No cuenta con un reservorio para el almacenamiento del biogás producido, y causa que gran parte de la producción de biogás sea perdido en el medio.

La implementación de un sistema de almacenamiento permitiría el aprovechamiento del biogás en otras actividades de la hacienda donde el funcionamiento esté involucrado con este recurso. Este biogás tiene diversas aplicaciones en la industria y en los hogares, básicamente permitiendo la combustión del mismo y así generando beneficios económicos para la hacienda [1].

Teniendo conocimiento de lo anterior, el objetivo general es construir y adaptar un reservorio portátil para el almacenamiento de biogás generado por el biodigestor de la hacienda la Cosmopolitana con el fin que este biogás sea almacenado y utilizado como fuente energética para la Hacienda. Los objetivos específicos radican en: cuantificar la producción diaria de biogás en el biodigestor de la hacienda la Cosmopolitana, optimizar el almacenamiento de biogás del biodigestor de la hacienda a través del reservorio y desarrollar un plan de usos teniendo en cuenta la producción de biogás y las necesidades de la hacienda.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la ejecución de la construcción del reservorio se llevó a cabo un plan de acción que contenía las siguientes fases:

Visita a la hacienda la Cosmopolitana

Se realizó una visita el día 18 de marzo y una segunda el 7 de mayo de 2016 donde se identificó la proble-

mática que presenta el biodigestor ya que no se encuentra en una etapa de explotación productiva puesto que presenta fallas para la producción de biogás.

En la visita del 18 de marzo se realizaron entrevistas a los trabajadores con el fin de obtener información relacionada con el manejo y características estructurales del biodigestor. En la visita del 7 de mayo se realizó el cambio de tanque de almacenamiento por un tanque de plástico circular (caneca) y se tomaron las respectivas mediciones de presión del reservorio.

Construcción del reservorio

Para la construcción del reservorio se utilizó como tanque de almacenamiento, una caneca plástica sellada de 60cm por 30cm. Para los sistemas de suministro (biodigestor - reservorio) y salida (reservorio - nuevo uso) del biogás se realizaron dos agujeros en la parte superior del tanque y se instalaron dos uniones universales de PVC de ½" unidos a tubos PVC cortados y lijados a la manguera y la llave reguladora. [2].

Materiales:

Caneca plástica (60 x 30)

Manguera para gas ½"

Adaptadores para manguera y abrazaderas

Uniones PVC ½"

Llave reguladora ½"

Tubos PVC ½" (20cm)

Cinta Teflón

Soldadura para PVC

Manómetro

Adaptación Reservorio-Biodigestor

La adaptación con el biodigestor se realizó con el sistema de suministro y salida del reservorio, que permitía el paso del biogás para el posterior llenado del reservorio. El sistema de suministro y salida se realizó de la siguiente manera: unir la unión universal al tubo PVC con teflón y sellador de PVC, al tubo de PVC unirle manguera para gas y a esta unirle una llave reguladora, la llave reguladora ira unida en el otro extremo a una manguera para gas que tendrá la unión para adaptarla al biodigestor o al sitio donde se entregara el biogás. [3].

Figura1. Adaptación del reservorio y biodigestor

Determinación de la presión del reservorio

Para determinar la presión del reservorio se insertara un manómetro en escala psi en la tapa del tanque y se tomaran los datos de presión desde el momento de llenado en diferentes tiempos [5].

RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo a las variable evaluadas (tiempo y número de quemadores en uso), se asume que el biodigestor de la hacienda la Cosmopolitana tiene una producción diaria de biogás capaz de complementar la necesidad energética de la cocina al permitir cocinar 6 horas en una estufa regular de 4 puestos. Si el consumo de una estufa regular por quemador es de 0.1319m³ /h con la ecuación (1) se puede obtener la cantidad de metros cúbicos por día [6].

$$N^{\circ} \text{ quemadores} * 0.1319 * \text{Horas al día} = m^3/\text{día} \quad (1)$$

Al tomar la tasa de producción del biodigestor tenemos:

$$4 * 0.1319 * 6 = 3.2m^3/\text{ día}$$

Un metro cubico (1m³) equivalen a 1000L, con lo cual se puede deducir que el biodigestor tiene una taza de producción de 3200L de biogás diarios y al mes de 95000L /mes. El biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural.

Identificado el volumen de producción del biodigestor, se procedió a cuantificar el volumen del reservorio a través de la ecuación (2):

$$V = \pi r^2 h \quad (2)$$

$$V = \pi(15^2)60 = 42411.5cm^3$$

$$\frac{42411.5cm^3 * 0.001L}{1cm^3} = 42.4L$$

Donde: V; es el volumen; r , el radio h, la altura; posterior a esto, se instaló el reservorio al biodigestor donde inicio el proceso de almacenamiento del biogás producido. Se realizó una revisión del contenedor con el fin de identificar alguna fuga, la cual no se presentó. De acuerdo con este valor de almacenamiento, equivaldría a más o menos 1.25% de la producción diaria del biodigestor. Este reservorio al presentar un tamaño adecuado (pequeño), es liviano y permite ser manipulado de una manera más eficaz y sencilla; esto con el fin de ser portátil ya que está adaptado con una manguera de salida que se abre y se cierra a disposición para el aprovechamiento del biogás en cualquier parte de la hacienda donde sea requerido.

En la tabla 1 se muestran los datos obtenidos de la presión del reservorio en diferentes tiempos.

Tabla 1. Tiempo en función de la Presión

tiempo	presión(psi)
0	0
2:20	10
2:40	18
3:00	25
3:20	35
3:40	42
4:00	60
4:20	74

En la figura (1) se muestra una gráfica de la variación de la presión respecto al tiempo de llenado del reservorio.

Figura 2. Presión en función del tiempo

Para determinar la cantidad de gramos de metano y de dióxido de carbono que hay en el reservorio a una determinada presión se utilizó la ecuación de los gases ideales (3).

$$PV = nRT \qquad n = \frac{PV}{RT} \qquad (3)$$

Donde

$$n = \frac{m}{PM} \qquad m = n * PM$$

$$n = \frac{74*42.4}{8.314*32} = 11.79 \text{ mol}$$

Siendo que P, es la presión, V, el volumen de caneca, n, el número de moles, R, la constante universal de los gases y T, la temperatura (32°C). Para un reservorio pequeño como el que se construyó se espera que tenga una capacidad del 1.25% en relación con la capacidad de producción del biodigestor; este número de moles es un valor aceptable debido a la poca cantidad de biogás que esta almacenando.

Tabla 2. *Peso Molecular de los componentes del Bigas producido*

Componente	Peso Molecular
Metano (CH ₄)	16.04g/mol
Dióxido de Carbono (CO ₂)	44.01g/mol
Total	60.05g/mol

Teniendo en cuenta que en el biogás hay ±70% de metano y ± 30% de dióxido de carbono y su peso molecular (tabla II) podemos relacionar el número de moles y determinar la masa de cada componente:

$$m = 11.79mol * \frac{60.05g}{mol} = 707.98g$$

$$g \text{ de } CH_4 = \frac{70\%*707.98g}{100\%} = 495.5g$$

$$g \text{ de } CO_2 = \frac{30\%*707.98g}{100\%} = 212.4g$$

Cuando el reservorio se encuentra con una presión de 74psi se puede decir que se tienen 495.5 g de metano y 212.4 gramos de dióxido de carbono.

El biogás puede someterse a un tratamiento previo hasta alcanzar la calidad de gas natural (biometano, metano hasta un 98%), luego se puede utilizar en lugares con una alta demanda de calor y se consigue una máxima eficiencia, produciendo simultáneamente electricidad [7].

El biogás se utiliza en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. En el siguiente esquema se verán reflejados los usos del biogás (Figura 2):

Figura 2. *Usos del biogás*

Por lo tanto el uso del biogás almacenado en el reservorio será de gran utilidad puesto que tiene otros usos como en lámparas de gas y también para uso en vehículos, entre otros; independientemente del uso de este biogás será mejor que el no aprovechamiento de este mismo. Además del aprovechamiento del biogás se puede hacer uso del fertilizante llamado biol como subproducto, para el abono de los diferentes cultivos presentes en la hacienda [8]. La tasa de producción diaria es de 3200L por biodigestor (aproximadamente), de los dos que hay en la hacienda; si se tuviera en funcionamiento el otro se podría contar con una tasa de producción diaria de 6400L lo que aumentaría los usos para este biogás o el tiempo de duración ya sea en la cocina o en iluminación.

Cabe aclarar que este biodigestor no está en una etapa de explotación productiva por ende es un modelo no funcional; el biodigestor está produciendo el biogás al pasar de horas y días, a medida que el biodigestor se llena de biogás su tasa de almacenamiento se va acortando hasta que llega a su tope máximo, una vez ahí en su tope, el biogás sobrante empieza a salir por una válvula de escape la cual sale al medio ambiente; lo que se analizó como una pérdida de producción de dicho proceso, para mejorar esto se implementó un mecanismo de optimización de almacenamiento del biogás producido por el biodigestor, este mecanismo fue la construcción e implementación del

reservorio de biogás el cual tiene como objetivo principal almacenar el biogás sobrante producido por el biodigestor, para luego usar este biogás con otros fines productivos dentro de la hacienda La Cosmopolitana. La presión fue aumentando a medida del tiempo como se puede observar en la gráfica 1, Lo que evidencia la capacidad de llenado del reservorio. Con estos resultados se recomienda estudiar cuales serían las mejores condiciones para el almacenamiento de un 30 o 40% de este biogás.

El aprovechamiento y la utilización de los recursos dentro de la hacienda deberían tener establecido un orden de aplicación dependiendo de las principales necesidades y demandas energéticas que esta genera para cumplir con sus procesos agrícolas y el consumo de los turistas que la visitan.

CONCLUSIONES

El reservorio utilizado para este caso, era un reservorio cilíndrico con unas medidas 60cm de altura, 30cm de diámetro, teniendo un volumen de 42411.5cm³. El cual cumple con la función de almacenar aunque no sea una cantidad muy considerable respecto a la producción diaria del biodigestor. En una presión de 74 psi se encuentran 495,5 g de metano y 212,4 gramos de dióxido de carbono. Las nuevas alternativas de fuentes energéticas podrían mejorar notablemente las utilidades económicas de quienes se pudieran ver beneficiados con este tipo de prácticas. El aprovechamiento y la utilización de los recursos dentro de la hacienda deberían tener un programa de aplicación teniendo en cuenta las principales necesidades y demandas energéticas que esta genere. La hacienda la Cosmopolitana es un lugar de esparcimiento educativo, pedagógico y empresarial por lo cual es visitada constantemente, lo que genera una gran demanda de consumo de recursos energéticos, esta demanda de recursos podría ser reducida mediante el aprovechamiento continuo de estos, la implementación y transformación del biogás en

energía lumínica aumentando la eficiencia energética de la propiedad rural y así contribuir a la sostenibilidad del lugar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] La cosmopolitana.com CENTRO AGROECOLÓGICO LA COSMOPOLITANA. "La Cosmopolitana" [online] Disponible en: <http://www.lacoscopolitana.com/index.php/la-coscopolitana/mision-y-vision>

[2] Herrero J., "Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares" [online] disponible en: http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/10bib_arch.pdf [consultado el 24 Abr. 2016].

[3] Guevara A., "fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales", (1996) [online] disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf> [consultado el 24 Abr. 2016].

[4] Varnero M., "manual de biogás" (2011), [online] disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf> [consultado el 24 Abr. 2016].

[5] bvsde.paho.org RESERVORIOS – Componentes de un reservorio[online] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/inspecciones/lec5.pdf>

[6] Ecogas.com.mx. (2016). ECOGAS - Calcula tu consumo de gas. [online] disponible en: <http://ecogas.com.mx/calcula-tu-consumo-de-gas.html> [consultado el 24 Abr. 2016].

[7] Collazo M., "biogás", [online] disponible en: http://www.altercexa.eu/images/archivos/Areas%20Tematicas/Biogas/Biogas_-_ES_-_Biogas.pdf [consultado el 28 Abr. 2016].

[8] cartilla de biodigestores , biodigestor de flujo continuo <http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/SiteAssets/Images/MenuSuperiorArchivos/CARTBIODIG.pdf>

IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE POTENCIALES ENERGÉTICOS: HÍDRICO, SOLAR Y BIOMASA, EN HACIENDA LA COSMOPOLITANA

Guillem Pedro¹
Varón David ¹
Mayorga Santiago¹
Benítez Daniela¹
Cruz María Fernanda¹
Casabianca Luis Miguel¹

¹ Universidad El Bosque
Luismiguelcasabainca@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas: Energía Solar, Hidráulica.

RESUMEN

La Hacienda la Cosmopolitana, ubicada el municipio de Restrepo, Meta, posee potenciales energéticos no cuantificados, los cuales, de aprovecharse podrían aumentar la sustentabilidad energética de la hacienda, disminuir su huella ecológica y reducir significativamente los costos operativos. Se realizó un inventario energético a partir de la cuantificación de la biomasa de palma viva y en suelo por unidad de Área. Se realizó la medición de biomasa en suelo (hojas caídas) en dos áreas de 2m² y 4.5m². Teniendo en cuenta el estado húmedo de la primera zona (2m²), se repitió el ensayo en un segundo punto de muestreo con biomasa seca. La biomasa viva fue cuantificada manualmente en 16 recorridos. Se recorrieron las fuentes hídricas, identificando aquellas donde hubiese caída a nivel y altura favorables, para ser considerada una fuente hídrica con potencial aprovechable y en la solar se identificaron las potenciales zonas de aprovechamiento en términos de cercanía a la red eléctrica y construcciones con superficies expuestas (techos) no aprovechados. Se encontró dichas fuentes son significativamente abundantes en relación al consumo interno de energía y representan un potencial combinado explotable cercano a 153.8 Kilowatts/hora (netos), los cuales 73% son de origen solar, 19% de nueva biomasa y 8% de fuentes hídricas.

Palabras claves: Potenciales Energéticos, Energía Hidráulica, Energía Solar, Biomasa, Sostenibilidad.

INTRODUCCIÓN

Como cualquier establecimiento comercial, Hacienda la Cosmopolitana consume energía eléctrica para el desarrollo de sus actividades cotidianas, utilizando un promedio mensual de 1457 Kw. Se utilizaron 1.548 Kw durante Marzo de 2016, cuyo costo fue \$1.074.860 COP (\$370 USD) ver anexo N° 1. Existen recursos energéticos no explotados en la Hacienda que pueden ser utilizados para lograr independencia eléctrica. Así mismo, actualmente no existe un inventario energético documentado que se pueda emplear en la toma de decisiones.

Se estudió la situación energética mediante encuesta directa a los empleados de la Hacienda, obteniendo un ejemplar de la última factura de energía e información sobre las prácticas que ya se implementan para explotar recursos renovables in situ.

El estado del arte de las tecnologías de autogeneración hace viable la explotación responsable de fuentes renovables de energía; tales como caudales hídricos, irradiación solar y biomasa. Habiendo estas fuentes en el sitio, su no aprovechamiento constituye un sujeto pasivo (activo no explotado) entendiendo el recurso como un superávit energético comercializable según la Ley 1715 de 2014, la cual habilita a pequeños generadores a vender su auto-generación de vuelta a la red, existiendo posibilidades reales de lograr independencia eléctrica e inclusive un ingreso adicional constante [1]. Contar con un inventario energético constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones asertivas en materia energética. Un subproducto del presente artículo constituye dicho inventario

MATERIALES Y MÉTODOS

Biomasa y su potencial

Cuantificación de Biomasa en suelo por unidad de Área

Se realizó la medición de biomasa en suelo (hojas caídas) en dos áreas de 2m² y 4.5m². Teniendo en cuenta el estado húmedo de la primera zona (2m²), se repitió el ensayo en un segundo punto de muestreo (4.5m²) con biomasa seca. Las muestras obtenidas fueron capturadas y pesadas manualmente empleando una báscula digital de grado comercial modelo MFG-25 marca TEXON, excluyendo el peso del costal contenedor.

Obtención de Datos para Biomasa de Palma

Se diseñaron 16 recorridos a través de los senderos de la hacienda, cuantificando manualmente todas las variedades de palma. Se documentaron para cada recorrido las siguientes características: cantidad de árboles de palma por recorrido, cantidad promedio de ramas por árbol, longitud promedio de las ramas en metros, peso promedio las ramas de cada zona (en kilos), referenciando los valores obtenidos a una coordenada geográfica.

Estimación de cantidades numéricas

Para el cálculo de cada promedio se emplearon 10 mediciones por zona. Para capturar el peso promedio de ramas de palma se utilizó una báscula digital de grado comercial modelo MFG-25 marca TEXON, tomando como muestra las ramas secas en la base de los árboles. El conteo de ejemplares (árboles) y sus respectivas ramas promedio se realizó de forma visual, contando exclusivamente las ramas vivas y secas aún sujetas al árbol. No se obtuvo ni se documentó cantidad promedio de ramas de palma seca en suelo sobre los senderos.

Geo-posicionamiento

Se tomó una coordenada geográfica cada 20 pasos empleando un macro programado en Visual Basic (Anexo I) y Excel 2013, empalmando la tabla a un origen de datos GPS a través de una red Wi-Fi en modo Ad-hoc. Se utilizó la aplicación "NMEA GPS" en un móvil iPhone6 cuyo error fue aprox. 5 metros. El PC utilizado fue un Netbook modelo Acer-One con procesador Intel Atom, 1 GB de RAM y Windows 7.

Geo-referenciación

Se convirtió la captura desde formato NMEA (posición en punto flotante) a formato DMS, exportando posteriormente el set a la herramienta "Google Fusion Tables", donde se obtuvieron los mapas georeferenciados y el análisis por gradiente de concentración de biomasa, posteriormente pasando a "Google Earth" para la construcción del resultado en archivos de extensión KML.

Potencial Hídrico

Identificación de potenciales hídricos

Se recorrieron una a una las fuentes hídricas de la hacienda, identificando aquellas donde hubiese caída

a nivel y altura favorables, además de un área suficiente y significativa para ser considerada una fuente hídrica con potencial aprovechable.

Obtención de características del potencial hídrico

Para la cuantificación del potencial hídrico de cada zona, se empleó el método por “caudal abierto” medido desde un Micromolinete modelo C2 de marca OTT, registrando los valores en RPM (Velocidad agua vs. Velocidad del rotor). Los valores obtenidos fueron posteriormente expresados en términos de velocidad, empleando la ecuación $V = 0.2520 * (n/ t) + 0.006$, donde V es la velocidad del río y n/t = revoluciones por minuto. También se emplearon las ecuaciones ($A=a*p$), donde A=Área, a=ancho y p=profundidad y ($Q = V*A$), donde A = Área, Q = Caudal y V = Velocidad del fluido.

Obtención de potenciales energéticos hidráulicos

Luego de identificar los caudales de las diferentes fuentes hídricas se procedió a la cuantificación de los potenciales energéticos utilizando la ecuación $P=Qghp$, donde P es potencia en Watts, Q el caudal en m3/s, ρ_{H2O} la densidad del agua ($\rho=1000 \text{ Kg/m}^3$), g la constante de gravedad y h la altura en metros. [2]

Identificación de Zonas con Potencial Solar

Cuantificación del Potencial Solar

Se emplearon datos disponibles en la corporación ambiental regional (Cormacarena) para determinar los niveles de irradiación solar de la zona en Kw/h/m2/día; teniendo en cuenta la obstrucción por vegetación y la luz efectiva sobre el techo en horas/día sobre la superficie. Así mismo, se recurrió a modelos de panel existente para estimar la eficiencia de generación.

Geoposicionamiento y Georeferenciación

Se empleó el mismo sistema utilizado en recorridos para obtener posiciones GPS, construyendo polígonos alrededor de los lugares de interés para obtener su área. Se tradujeron los polígonos obtenidos empleando “Google Fusion Tables”.

Medición Área de Techos

Se empleó geometría descriptiva y un metro para determinar el área aproximada de todos los techos de la Hacienda.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Los resultados se obtuvieron mediante inspección directa, conteos y medición de variables físicas relevantes in-situ, a través de las actividades y recorridos especificados en la metodología.

Cuantificación de biomasa

A continuación se presentan los resultados de medir la cantidad de biomasa viva en la Hacienda, realizando un conteo manual de los arboles como se ilustra en la tabla 1.

Tabla 1. Biomasa Estimada (Ramas de Palma)

Árboles de Palma Contados	3666
Ramas promedio por Árbol	12,82
Peso promedio por Rama	1.61 Kg
Longitud promedio por Rama	5,28 m
Cantidad Estimada de Ramas	47018
Biomasa Total en Ramas de Palma	75512 Kg

Los valores de la Tabla 1 corresponden a las sumatorias de los promedios obtenidos en Tabla 2. En la figura 1 se muestran los recorridos realizados en la hacienda para la cuantificación de cada una de las variables descritas en las tablas 1 y 2.

Figura 1. Recorridos a través de la Hacienda

En la tabla 2 se muestran el número de hojas por palma por recorrido, la cantidad de palmas, el peso de las hojas en Kilogramos, el largo de las hojas en metros, además de los valores ponderados de cada variable en relación al total.

Tabla 2. Cuantificación de Variables por Cada Recorrido

R#	Palmas	Ramas x Palma	Peso (Kg)	Largo (m)	%Rel	R	P	L
1	31	18	0,5	2,3	0,8	0,15	0,004	0,02
2	50	14	0,8	4,24	1,3	0,19	0,010	0,06
3	19	16	0,8	4,51	0,5	0,08	0,003	0,02
4	243	17	0,8	5,8	6,6	1,13	0,049	0,38
5	335	10	1	3,9	9,1	0,91	0,091	0,36
6	102	8	0,5	2,3	2,7	0,22	0,013	0,06
7	157	10	0,3	1,9	4,2	0,43	0,010	0,08
8	12	10	0,3	2,12	0,3	0,03	0,000	0,01
9	237	11	1,5	4,51	6,4	0,71	0,096	0,29
10	145	11	1,5	3,9	3,9	0,44	0,059	0,15
11	930	12	1,5	7,95	25,3	3,04	0,380	2,02
12	91	14	4	4,5	2,4	0,35	0,099	0,11
13	739	13	2,5	5,5	20,1	2,62	0,503	1,11
14	233	14	2	4	6,3	0,89	0,127	0,25
15	278	18	1,8	4,23	7,5	1,36	0,13	0,32
16	64	15	1	2	1,7	0,26	0,017	0,03

Las columnas: Ramas, Peso y Largo corresponden al valor promedio obtenido por recorrido. El peso se muestra en Kg. El Largo en Metros.

La columna “% Rel” expresa la relevancia ponderada de cada recorrido con respecto al total de Palmas contadas en todos los recorridos.

Los promedios ponderados de Ramas, Peso y Largo en la **Tabla 2** se obtuvieron sumando las columnas **R, P y L**, que corresponden al valor ponderado de cada variable ajustada a su relevancia según el total de árboles en cada sendero.

Los resultados de la Tabla 3 muestran la densidad de biomasa en suelo según su posición geográfica en la Hacienda, representado en un gradiente de concentración como se ilustra en la Figura 2

Tabla 3. Cuantificación de Biomasa en Suelo

Muestras en Áreas de 2,0 x 2,0m	5,97 Kg
Peso promedio por m² de suelo	1,49 Kg/m²
Area total Explotable (79%)	102886 m²
Biomasa Total (en suelo)	153300 Kg

Figura 2. Gradiente Concentración de Biomasa en Suelo

Se excluyen del área de suelo cuantificable los senderos, las lagunas, zonas no arborizadas y las zonas construidas (aprox. 27.114 m2).

Potencial Energético Solar

El potencial energético solar se evaluó en zonas alejadas a las edificaciones y en los techos de las edificaciones de la hacienda. Estos lugares tienen como característica una baja afectación de la sombra producida por los árboles, cómo se relaciona en la figura 3.

Figura 3. Zonas idóneas para aprovechamiento Solar

Se identificaron 4 zonas idóneas para el aprovechamiento de energía solar; condición atribuida a su posición estratégica con respecto a la sombra de los árboles. En las tablas 4 y 5 se relacionan los valores de potencial energético solar efectivo por unidad de área, discriminando entre cada zona completa (techos y terreno) y solo en techos.

Tabla 4. Energía Solar Potencial por Zona

Zona Completa	Área [m²]	KW/h(brutos)	KW/h(netos)
Cabañas	1426	535	98,11
Establo/Porqueriza	984	369	67,67
Casa Cuidandero	979	369	67,71
Kiosco	1792	672	123,24
TOTAL	5281	1944	356,69

Tabla 5. Energía Solar Potencial en Superficie de Techos de Edificaciones

Solo Techos	Área [m²]	KW/h(brutos)	KW/h(netos)
Ambas Cabañas	346	129,7	23,7
Establo/Porqueriza	383	143,7	26,35
Casa Cuidandero	259	97,1	17,80
Kiosco	643	241,2	44,23
TOTAL	1631	612	112,08

Para calcular las tablas 4 y 5 se empleó el potencial de energía solar (bruta) disponible en la zona del Meta

[3], la cual se sitúa entre 4 y 4,5 Kw/h/ m²/día, es decir: 375 W brutos por m².

El potencial neto se calculó empleando la eficiencia efectiva del modelo de panel de 30mm actualmente instalado en la Hacienda (18,34%). Las 4 zonas idóneas identificadas se caracterizan por no presentar ningún tipo de limitación que impida el funcionamiento de paneles solares.

Potencial Energético Hidráulico

La Hacienda la Cosmopolitana cuenta con 3 zonas idóneas (Ubicación turbina Pelton, Suministro de la quebrada Choapal, Quebrada Choapal) identificadas por el grupo de trabajo para evaluar potenciales a partir de recursos hídricos, dado que visualmente éstas cuentan con un caudal y una caída favorables, de los cuales se puede sacar provecho energético. A continuación se presentan los datos que se obtuvieron de las mediciones realizadas y de los cálculos realizados para finalmente obtener el potencial energético de cada recurso Hídrico. En la tabla 8 se relacionan las mediciones de los potenciales energéticos hídricos en términos de profundidad, altura de caída, ancho del cauce y velocidad (en RPM) de las 3 zonas mencionadas anteriormente.

Tabla 8. Medición de los potenciales hídricos

Puntos de muestreo	Revoluciones por minuto (rpm)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Altura caída (m)
Pelton	84	0,070	0,845	1,105
Suministro quebrada Choapal	122	0,145	0,220	1,16
Quebrada Choapal	52	0,046	0,951	0,865

Las mediciones fueron tomadas con micromolinete y metro (en los tres puntos de referencia). Estos valores fueron utilizados posteriormente para hallar la velocidad del agua, el área por la que pasa el agua y finalmente el caudal y la potencia, datos que se observan en la Tabla 9

Tabla 9. Datos calculados de los potenciales energéticos hídricos

Puntos de muestreo	Velocidad (m/s)	Área (m²)	Caudal (m³/s)	Potencia (Kw)
Pelton	0,3588	0,0591	0,0212	0,22957
Suministro quebrada Choapal	0,5184	0,0319	0,0165	0,18757
Quebrada Choapal	0,2190	0,0437	0,0096	0,08138

Las 3 zonas mencionadas anteriormente se caracterizan por tener un flujo constante de agua, una caída (importante para la adquisición energética), una velocidad favorable y un área, factores que influyen para que el caudal aumente o disminuya en el tiempo.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Biomasa

Se eligió la palma como recurso vegetal energético principal en la Hacienda por su abundancia aparente en relación a otras especies. Teniendo en cuenta el ciclo fenológico de las especies encontradas y su tasa de emisión foliar, se evidencia que el desarrollo de las hojas y ramas es lento; tomando de dos a tres años desde la iniciación de la hoja hasta la apertura de los foliolos en el centro de la corona estimando que se producirá en promedio el equivalente a una nueva rama completa (o 20 a 35 hojas) una vez por año por cada árbol [4].

El peso promedio cuantificado por cada rama fue de 1,61Kg, el cual resulta ser bajo en relación a los 5 Kg promedio documentados en la literatura; sugiriendo que las palmas en la Hacienda son relativamente jóvenes y se encuentran en su etapa más productiva [5]. Empleando la tasa de emisión foliar para determinar la tasa de producción de nueva biomasa, es razonable afirmar que si cada palma de la hacienda crece a razón de 1,61Kg/año, indicaría una producción constante de 134 gramos por mes/árbol, es decir, 419,2 Kg de nueva biomasa cada mes.

Teniendo que el contenido energético en la hoja de palma es 17.9 MJ/Kg en ramas y hojas [6], se puede concluir que la Hacienda posee 1351,6 TJ de energía potencial térmica en biomasa viva (375 MW) y una producción de 7503 MJ (2,08 MW) adicionales por mes.

En la tabla 10 se relacionan los valores energéticos de la biomasa existente y la nueva biomasa por mes, expresados en Joules y Watts.

Tabla 10. Energía Calculada en Biomasa de Palma

Origen Energético	Energía (Joules)	P (Watts)
Biomasa Viva	1351,6 TJ	375 MW
Nueva Biomasa/mes	7503 MJ	2,08 MW

Dividiendo la producción de nueva biomasa/mes (2.08MW) en entre 30 días, obtenemos que la vegetación de la hacienda acumula energía potencial de biomasa a razón de 69,4 KW/día (brutos).

Teniendo que la eficiencia de la conversión termoelectrica es cercana al 40% [7], si se incinerase a diario la nueva biomasa de palma producida en el día, al menos teóricamente, se podrían generar 29,8 kW/día (1,24 kW/h) de energía eléctrica, lo cual representaría sólo el 59% del consumo diario promedio. De utilizar toda la biomasa viva de palma disponible al momento de este estudio, podría suministrar 106 meses ininterrumpidos de energía termoelectrica, entregada a razón de 1,8 kW/h (0,84 árboles de palma por día).

Si bien lo anterior es energéticamente posible, la incineración de biomasa es una práctica desestimada e inviable por los sub-productos e impactos ambientales que produce. Una alternativa viable, tecnológicamente posible y con menor impacto ambiental sería la obtención y posterior combustión de bioetanol a partir de la biomasa, potencial que no fue cuantificado en este estudio y que representaría un gran aporte para calcular un aprovechamiento de este recurso.

Energía hidráulica

Se encontró un potencial energético teórico (bruto) de 0,498 kW/s combinando los tres puntos de muestreo, evidenciando que sería más viable la utilización de la energía solar y procesamiento de biomasa.

Con respecto a los valores de las tablas 8 y 9 se infiere que el punto más útil para la obtención de energía es el punto "Pelton". Según los valores obtenidos en las mediciones (Tabla 8) este punto proporciona una energía total bruta de 0,22957 kW/s. Los valores medidos como la profundidad, el ancho y la velocidad son de gran importancia, puesto que permite medir la cantidad de agua que pasa por un área en una unidad de tiempo (Caudal).

El potencial hidráulico descrito en la tabla 9 fue calculado con una eficiencia del 100% en transformación de la energía y aprovechando el 100% de la altura de la caída, por lo tanto, los valores de la tabla 9 en kW/s son brutos y no netos. Al obtener valores netos, la potencia disminuye como mínimo en un 20%, puesto que la eficiencia del sistema depende del tipo de turbina que se utilice en la obtención de energía.

La turbina OSSBERGER cuenta con mayor eficiencia de transformación, siendo de un 80% [9]. Para obtener los valores reales de caída se debe tener en cuenta el tamaño de la turbina a utilizar, en tanto que esta no puede ir por debajo de la superficie del agua e implica una disminución de la energía teórica debido a la reducción de la altura de la caída.

Es importante destacar las dimensiones que se requerirían para la ubicación de la turbina con el fin de optimizar su instalación. Existen en el mercado mini turbinas para generación hidroeléctrica (10 kW/h a 100 kW/h), observando que han sido diseñadas para una mayor potencia en comparación a la mínima hallada. Se encontró que sería necesaria la construcción de una turbina a medida que pueda adaptarse a los caudales y caídas de la Hacienda para producción de energía hidráulica, debido a las especificaciones del fabricante (40 l/s a 13.000) [10].

Cabe resaltar que el caudal de los tres puntos de muestreo depende directamente de las precipitaciones sobre la Hacienda durante el año, afectando la potencia en el tiempo. Finalmente se determinó que el potencial energético neto extraíble de las 3 fuentes hídricas combinadas, es de 0.498 kW/h, representando sólo el 7% de la energía total de la Hacienda

Energía Solar

Se determinó un potencial neto explotable (sumando todas las áreas) de 356,69 kW/h, calculados a partir de la eficiencia de los paneles y el potencial bruto; añadiendo que, de emplear solo los techos de las edificaciones, el potencial neto explotable máximo sería de 112,08 kW/h, estableciendo que la energía solar es la fuente de energía más abundante y viable disponible en la Hacienda.

De acuerdo a la caracterización y cuantificación de los espacios idóneos para producción de energía a partir de la radiación solar, se realizó una búsqueda de diferentes tipos de paneles solares se encontró que en paneles policristalinos de silicio la eficiencia es del 18,34%, siendo los escogidos como los mejores en eficiencia [3].

Tomando como criterio prioritario la eliminación de los elevados costos de energía eléctrica y teniendo que actualmente la Hacienda consume 48,6 kW/día (2,08 kW/h), se requerirían 30 paneles de 1,93m² para generar una media de 6,01 kW/h (200 watts/h por panel, compensando la curva de generación), inyectando efectivamente a la red 60 kW/día en un período de 10 horas, cubriendo la totalidad del consumo diario actual. El área necesaria para lograrlo es de 57,9m² de techos, correspondiente al 3,53% del espacio total disponible en los mismos. Teniendo en cuenta que las horas de luz con máxima generación comprenden solo 10 de las 24 horas, que la altura de sobre la línea ecuatorial es aproximadamente 4° y que el ángulo de incidencia de la luz solar no es el óptimo durante la

mayor parte del ciclo de generación, se contempló que el sistema además de compensar una curva de carga en forma de campana, debe poder generar durante el día la totalidad de la energía consumida por la Hacienda incluyendo el período nocturno, en tanto al ser inyectada más energía de la que se está consumiendo, esta se desplazará de vuelta a la empresa de energía haciendo que el contador de luz retroceda durante el día (habilitado por la Ley 1715 de 2014), compensando el consumo nocturno.

En lugar de usar baterías de almacenamiento, resulta conveniente la inyección de la corriente directamente a la red eléctrica a través de un inversor monofásico tipo “Grid Tie” con eficiencia de hasta el 97,5%, los cuales de acuerdo a lo investigado existen en amplia variedad de modelos y precios, siendo escogido el modelo comercializado por IMSOLTEC. Tomando los precios de equipo y tecnología de la referencia [7] (expresados en valor presente) y el precio del inversor *Grid Tie* de 6 Kw tomado del fabricante [8], se determina que sería necesaria una inversión de aprox. 56,4 Millones de pesos (amortizables en 52,5 meses) para que el costo energético de la Hacienda sea \$0 pesos.

Figura 4. Diagrama de torta: Potencial energético aprovechable: biomasa, energía solar e hídrica.

A continuación en la tabla 11 se presenta el inventario energético neto encontrado en las diferentes fuentes evaluadas en Hacienda La Cosmopolitana en relación con lo presentado en la figura 4.

Tabla 11. Inventario Energético Neto

Origen	Energía (neta) en Kw/día	Porcentaje
Biomasa Palma	29,8	19%
Hídrico	11,95	8%
Solar (Techos)	112,08	73%

Obtenemos que el potencial energético total disponible es de 153,8 kW/h. Siendo el mas abundante el potencial solar, con 112 kW diarios potenciales. Estudiando las tecnologías disponibles y su valor en el mer-

cado, calculamos la inversion aproximada para instalar una capacidad de 12 kW/h.

Costo unitario por Panel: \$ 1.629.600 COP

Inversión Total en Paneles: \$ 48.888.000 COP

Costo Inversor Grid-Tie: \$ 7.580.000 COP

Inversión Total: \$ 56.468.000 COP

Amortización de Inversión: 52,5 meses

CONCLUSIONES

La energía solar constituye un gran potencial eléctrico explotable en la hacienda: 74% de la energía total aprovechable. Si bien la inversión requerida para explotarla es bastante grande, se podría recuperar en 4 años. Teniendo en cuenta que la duración promedio de un panel es de 25 años, la Hacienda obtendría 21 años adicionales de ahorro e inclusive ingresos, si se llegase a producir superávit energético. Respecto a la energía hidráulica tiene la posibilidad de generar 400 W/h en su máxima eficiencia, puede proveer energía a la hacienda pero solo representa un 7% de la energía potencial disponible, por tanto su aporte no puede ser realmente significativo. La biomasa viva representa un recurso energético de enorme potencial, contenido tanto en las 3666 palmas censadas como en la Biomasa en suelo. Este recurso se incrementa lenta y progresivamente a sí mismo a razón de 2MW brutos por año, acumulando a la fecha mas de 375 MW de energía potencial térmica que de ser incinerada podría suministrar el 59% del consumo eléctrico durante 180 meses. La fermentación alcoholica para obtencion de bioetanol desde la celulosa es una opcion bajo estudio, representando una conversion energética un 30% mas eficiente que la combustión con 90% menos emisiones [5]. De emplearse una futura técnica para obtención de bioetanol a partir de la Biomasa en la hacienda, el potencial energético de este recurso pasaría a representar un 26% del total cuantificado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Congreso de la República de Colombia. “Ley 1715 de 2014”. [online].Colombia,2014. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf

[2] E. A. Guillén, Estimación de la Potencia Eléctrica. Nov de 2012. *Universidad Don Bosco*. Recuperado el 28 de 04 de 2016, de Universidad Don Bosco <http://rd.udb>.

edu.sv:8080/jspui/bitstream/11715/541/1/2-estimacion-de-la-potencia.pdf

[3] Manual de Modelos BLD Solar. BLD Solar 210 - 350w (60cells) Polycrystalline Solar Panel. En línea: <http://www.bldsolar.com/uploads/Instructions/295-310,72P.pdf>

[4] P. Hormanza, D. Forero, R. Ruiz. Fenología de la Palma. Centro de Investigación en Palma de Aceite. Colciencias. Bogotá - Colombia. Nov 2011. Recuperado el 5 de 05 de 2016. En línea: http://gsem.weebly.com/uploads/9/3/5/1/9351412/fenologa_de_la_palma_de_aceite_africana_y_del_hbriido_interespecfico.pdf

[5] Artículo: Los Ciclos vegetativos. Enero de 2010. Recuperado el 5 de 05 de 2016. En línea: http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article&id=113:ciclo-vegetativo&catid=45:caracteristicas&Itemid=53

[6] S. Hani, H. Ahmad, A. Arshad, B. Salema, A. Nasir. *Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis*. Department of Mechanical Engineering, King Abdulaziz University-Rabigh, Saudi Arabia. Pp. 383-389. Elsevier, Bioresource Technology. 2012.

[7] EFFICIENCY IN ELECTRICITY GENERATION. EURELECTRIC: "Preservation of Resources" Working Group with VGB. Pp.6, Julio de 2003. Sitio web en línea, recuperado el 14 de Mayo de 2016: <http://www.eurelectric.org/Download/Download.aspx?DocumentID=13549>

[8] Congreso de la República de Colombia. "Ley 1715 de 2014". [online]. Colombia, 2014. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf

[9] OSSBERGER. (s.f.). OSSBERGER. Recuperado el 28 de 04 de 2016, de OSSBERGER: <http://www.ossberger.de/cms/es/hydro/contacto/>

[10] Estudio técnico - económico para la implementación masiva de sistemas solares fotovoltaicos en estratos cinco y seis de la ciudad de Cali. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica. Programa Energética y Mecánica. Santiago de Cali. 2013. En línea, recuperado el 06 del 05 del 2016: <http://red.uao.edu.co/bitstream/10614/5219/1/TME01603.pdf>

[11] Manual de: The Ossberger Turbine: "OSSBERGER Turbines are individually tailored to the operating conditions (head/water flow)". Febrero 2001. En línea, recuperado el 14 de mayo de 2016: <http://www.hnsa.com.co/wp-content/uploads/2015/12/Ossberger-Turbine.pdf>

[12] Manual del Inversor ON GRID SOLAREEDGE SE5000A-US-U 5KW 208/240/277. ISMOLTEC. Sitio web. En línea, recuperado el 6 de 05 de 2016: <http://www.imsoltec.com/tienda/inversor-on-grid-solaredge-se5000a-us-u-5kw-208-240-277/>

SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CONTROL INTELIGENTE

Robles Algarín, Carlos¹
Taborda Giraldo, John¹
Restrepo Leal, Diego¹

¹ Universidad del Magdalena, MAGMA Ingeniería
carlosarturo.ing@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Energías Alternativas: Energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y mareomotriz

RESUMEN

Se presenta el diseño y modelado de dos controladores inteligentes, difuso y neuronal, con el fin de realizar un seguimiento del punto de máxima potencia de un panel fotovoltaico. Los controladores son una alternativa al tradicional método de perturbación y observación, el cual presenta problemas de estabilidad alrededor del punto de operación. Para el controlador difuso se definieron como entradas la pendiente y el cambio de la pendiente de la curva P-V y como salida el incremento del ciclo útil del convertidor DC-DC. Para el controlador neuronal se utilizó el modelo auto-regresivo no-lineal, utilizando como entradas la potencia, voltaje y corriente del panel y como salida el ciclo útil del PWM. Los resultados demuestran la efectividad del controlador difuso para alcanzar la máxima potencia en condiciones climáticas variables, mientras que el controlador neuronal muestra resultados aceptables que evidencian la necesidad de ajustar el entrenamiento de la red con datos experimentales.

Palabras claves: Lógica Difusa, Panel Fotovoltaico, Punto de Máxima Potencia, Redes Neuronales.

INTRODUCCIÓN

Debido a la crisis energética y a los problemas ambientales como la contaminación y el calentamiento global, la energía fotovoltaica (FV) se está convirtiendo en una solución muy atractiva para lugares con alta densidad solar. Lamentablemente, el costo de los paneles FV aún es elevado y su eficiencia de conversión sigue siendo baja, puesto que es muy poca la energía solar que se aprovecha para convertirla en energía lumínica. Para solventar este problema y obtener el máximo rendimiento posible, el diseño de todos los elementos de una instalación FV tiene que ser optimizado.

Existen diferentes alternativas para optimizar el rendimiento de una instalación FV, entre las que se destacan los seguidores solares, sistemas híbridos y los controladores del punto de máxima potencia (MPPT). Estos últimos se encargan de garantizar la mayor potencia disponible a una carga independientemente de las variaciones en las condiciones climáticas.

Para cumplir con el objetivo de implementar un MPPT, tradicionalmente se ha utilizado el método de Perturbación y Observación (P&O). Este método presenta problemas de oscilaciones alrededor del punto de operación y por lo tanto no ha sido el más adecuado para obtener el mejor rendimiento de un panel FV. En la literatura científica se encuentran diferentes trabajos de investigación que abordan la solución a esta problemática desde diferentes enfoques utilizando técnicas de control que se resumen en [1], [2], [3], [4]. Se encuentran trabajos específicos para el seguimiento del MPPT con controladores difusos [5], [6], controladores neuronales [7], [8], algoritmo de enjambre de abejas [9], algoritmo de optimización de hormigas [10], algoritmo adaptativo [11] y P&O mejorado [12].

Teniendo en cuenta el contexto anterior, desde el grupo de investigación de la Universidad del Magdalena en Matemática Aplicada a la Ingeniería (MAGMA Ingeniería), a través de sus líneas de investigación en diseño electrónico y teoría de control, se viene trabajando un proyecto de investigación que busca realizar el diseño e implementación de controladores inteligentes usando lógica difusa, redes neuronales y algoritmos de optimización, con el fin de realizar un control eficiente del MPPT usando herramientas de hardware libre de bajo costo. En ese sentido, en el presente trabajo se presentan los avances de la investigación, los cuales a la fecha comprenden el diseño y modelado del panel FV, convertidor Buck DC-DC y los

algoritmos neuronal y difuso haciendo uso de Matlab y Simulink.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema de estudio comprende un panel FV, un convertor DC-DC, un controlador inteligente (neuronal o difuso) y una batería aislada como se muestra en la figura 1.

Figura. 1 Sistema caso de estudio

Modelo del panel FV

el modelo eléctrico utilizado para la simulación del panel solar es el propuesto en [13], el cual tiene como principal ventaja que solo necesita hallar el parámetro de ajuste de curva que puede ser obtenido directamente de la ecuación I-V. Con este modelo se puede representar el panel FV para valores dinámicos de irradiación y temperatura. Con la ecuación (1) se representa la relación I-V del panel FV:

$$I(V) = \frac{I_x}{1 - e^{\frac{1}{b}(\frac{V}{V_x} - 1)}} \quad (1)$$

Donde V_x e I_x son los voltajes de circuito abierto y corriente de cortocircuito para valores de irradiación y temperaturas dinámicos. Estos valores están definidos por las ecuaciones (2) y (3):

$$V_x = s \frac{E_i}{E_N} T C_v (T - T_N) + s V_{max} - s (V_{max} - V_{min}) e^{\frac{E_i}{E_N} \ln(\frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}})} \quad (2)$$

$$I_x = p \frac{E_i}{E_N} [I_{sc} + T C_i (T - T_N)] \quad (3)$$

Convertidor DC-DC

Se utilizó la tipología Buck DC-DC, en la cual el voltaje de salida es menor al voltaje de entrada y su principal función en el proyecto es que permite acondicionar la señal proveniente del panel FV utilizando las estrategias de control inteligente. Ver Figura 2.

Figura. 2 Convertidor DC-DC Buck

Aplicando análisis de circuitos y teniendo en cuenta que la corriente de salida crítica debe ser mayor o igual que la mitad del rizado de la corriente del inductor $i_o(crit) \geq \frac{\Delta I_L}{2}$, se obtiene la expresión para calcular el inductor según se detalla en la ecuación (4).

$$L \geq \frac{V_o(1 - \frac{V_o}{V_s})T}{2i_o(crit)} \quad (4)$$

Asumiendo que el rizado de corriente del inductor fluye a través del capacitor y que la componente de DC fluye a través de resistencia carga, la expresión para el capacitor se obtiene según el procedimiento detallado en la ecuación (5).

$$\Delta V_c = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{\frac{T\Delta I_L}{8}}{C} = \frac{T\Delta I_L}{8C} = \frac{\Delta I_L}{8CF} \rightarrow C \geq \frac{\Delta I_L T}{8\Delta V_c} \quad (5)$$

Controlador Difuso

El controlador difuso diseñado para poder seguir el MPPT tiene dos entradas y una salida. Las dos variables de entrada son el Error (E) y el Cambio en el Error (CE), definidas para tiempos de muestreo k en la ecuación (6):

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} = \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad \text{y} \quad CE(k) = E(k) - E(k-1) = \Delta E \quad (6)$$

La variable de salida del controlador es el incremento del ciclo útil del convertidor Buck ΔD . Con la ecuación (7) se realizó un acumulador para obtener el valor del ciclo útil

$$D(k) = D(k-1) + \Delta D(k) \quad (7)$$

Para el proceso de fuzificación se eligieron funciones de membresía triangulares. Para las entradas E, CE y para la salida ΔD del controlador se definieron 5 funciones de membresía expresadas en términos de las variables lingüísticas; Negativo Grande (NG), Negativo (N), Cero (Z), Positivo (P) y Positivo Grande (PG).

En la Tabla 1 se muestran las 25 reglas difusas definidas para el controlador, las cuales fueron ajustadas utilizando el Toolbox de lógica difusa de Matlab.

Controlador Neuronal

Para realizar el neuro-controlador se eligió a la red modelo auto-regresivo no-lineal con entradas NARX, la cual se aprecia en la figura 3.

Tabla 1. Reglas Si-Entonces

CE E	NG	N	Z	P	PG
NG	PG	P	P	P	P
N	PG	P	P	P	P
Z	P	P	Z	N	N
P	NG	NG	N	N	N
PG	NG	N	N	NG	NG

Figura. 3 Esquema general de una red NARX [14]

La red es descrita por la ecuación (8):

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n_u)) \quad (8)$$

Donde representa la señal de salida dependiente del tiempo y u la señal de entrada exógena dependiente del tiempo. Esta red es muy popular en aplicaciones de modelado de sistemas dinámicos y control, debido a que es una red neuronal dinámica que puede ser entrenada con el Static Backpropagation, lo cual facilita en gran medida los cálculos y el tiempo computacional que se debe emplear para que la red aprenda.

De lo anteriormente nombrado se infiere que la red NARX puede ser entrenada presentándole unas entradas y unas salidas deseadas, como se hace normalmente con otras arquitecturas de redes como el perceptrón multicapa (Feed-Forward). Para entrenar la

RNA y obtener la máxima transferencia de potencia, se creó una base de datos por medio de simulaciones realizadas en Simulink, en donde se modeló y simuló el panel FV y el conversor DC-DC, este modelo tiene como entradas la irradiación, la temperatura y una señal PWM y como salida una señal correspondiente a la potencia, voltaje y corriente del panel.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para corroborar el desempeño del controlador difuso, se hicieron pruebas con una temperatura constante de 25°C para cambios en la irradiación de 1000 W/m² a 500 W/m² en t=0,4s y de 500 W/m² a 900 W/m² en t=0,75s. Posteriormente se realizaron pruebas con una irradiación constante de 1000 W/m² para cambios en la temperatura de 25°C a 45°C en t=0,4s y de 45°C a 35°C en t=0,7s. En la figura 4 se puede observar la efectividad del controlador difuso que alcanza la máxima potencia de salida con tiempos de estabilización que rondan los 0,2s. Al comparar este resultado con el obtenido en [6], se distingue que en esta investigación la respuesta de controlador difuso posee menores picos en los tiempos que se producen los cambios de los parámetros climáticos.

Figura. 4 Resultados con el controlador difuso. a) E variable. b) T variable

En las figura 5 se muestra el resultado del controlador neuronal para valores de irradiación que varían desde 200 W/m² hasta 1000 W/m² con una temperatura constante de 25°C. Al observar la respuesta del controlador neuronal se distingue que no sigue de manera aceptable la señal ideal, un caso contrario se evidencia en [8] en donde la red tiene oscilaciones mínimas.

Figura. 5 Resultados con el controlador neuronal

CONCLUSIONES

Se diseñó un controlador difuso que permite seguir y controlar el punto de máxima potencia de un panel fotovoltaico. Las pruebas realizadas permitieron evaluar el desempeño del controlador difuso para cambios en los niveles de irradiación solar y temperatura de operación del panel FV. Los resultados obtenidos muestran la eficiencia del controlador minimizando los problemas de oscilación alrededor del punto de operación. Los efectos más severos sobre el desempeño del sistema se presentan cuando existen fuertes cambios en los niveles de irradiación y temperatura de operación afectándose de forma parcial la eficiencia del sistema de lazo cerrado. Por otra parte, las primeras pruebas con el controlador neuronal arrojan como resultado una mayor estabilidad que la respuesta del P&O tradicional. Aún no se alcanza la máxima potencia disponible, lo cual es aceptable debido a que el neuro-controlador aún está en etapa de desarrollo. Para solucionar los problemas presentados se deben modificar la cantidad de retardos, la cantidad de neuronas internas y actualizar la base de datos con mediciones reales en campo; situación que se encuentra en proceso de realización. Cabe resaltar que al implementar la red NARX se obtiene toda la versatilidad que ofrece una red neuronal dinámica, con la posibilidad de entrenarla con el algoritmo Static Backpropagation con el cual se entrenan redes neuronales estáticas y que es más sencillo de implementar desde el punto de vista matemático que el Dynamic Backpropagation.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] E. B. Mustafa y B. Çakır, «Comparisons of MPPT performances of isolated and non-isolated DC-DC converters by using a new approach,» *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, vol. 60, pp. 1100-1113, 2016.

[2] H. Bounechba, A. Bouzid, H. Snani y A. Lashab, «Real time simulation of MPPT algorithms for PV energy system,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 83, pp. 67-78, 2016.

[3] B. Bendib, H. Belmili y F. Krim, «A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 637-648, 2015.

[4] A. Rezaee Jordehi, «Maximum power point tracking in photovoltaic (PV) systems: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1127-1138, 2016.

[5] T. Hocksun Kwan y X. Wu, «Maximum power point tracking using a variable antecedent fuzzy logic controller,» *Solar Energy*, vol. 137, pp. 189-200, 2016.

[6] Y.-T. Chen, Y.-C. Jhang y R.-H. Liang, «A fuzzy-logic based auto-scaling variable step-size MPPT method for PV systems,» *Solar Energy*, vol. 126, pp. 53-63, 2016.

[7] S. Saravanan y N. Ramesh Babu, «RBFN based MPPT algorithm for PV system with high step up converter,» *Energy Conversion and Management*, vol. 122, pp. 239-251, 2016.

[8] P. Kofinasa, A. I. Dounisb, G. Papadakis y M. N. Assimakopoulosd, «An Intelligent MPPT controller based on direct neural control for partially shaded PV system,» *Energy and Buildings*, vol. 90, pp. 51-64, 2015.

[9] A. soufyane Benyoucefa, A. Chouderb, K. Karaa, S. Silvestrec y O. Ait saheda, «Artificial bee colony based algorithm for maximum power point tracking (MPPT) for PV systems operating under partial shaded conditions,» *Applied Soft Computing*, vol. 32, pp. 38-48, 2015.

[10] L. L. Jianga, D. L. Maskella y J. C. Patrab, «A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions,» *Energy and Buildings*, vol. 58, pp. 227-236, 2013.

[11] R. Pradhan y B. Subudhi, «Design and real-time implementation of a new auto-tuned adaptive MPPT control for a photovoltaic system,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 792-803, 2015.

[12] E. Ortiz, *Modeling and Analysis of Solar Distributed Generation*, Michigan: Michigan State University, 2006.

[13] J. Ahmed y Z. Salam, «An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency,» *Applied Energy*, vol. 150, pp. 97-108, 2015.

[14] M. Hagan, H. Demuth, M. Beale y O. De Jesús, *Neural Network Design*, 2nd Edition ed.

EFICIENCIA Y AUDITORIA ENERGÉTICA

EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD: METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS UNIVERSITARIOS

Duran Ramos Milena Sofia¹
Romero Ascanio María Angélica¹
Delgado Monroy José Antonio¹
Díaz Barbosa Jair¹

¹ Universidad de Santander - UDES, Ingeniería Civil Grupo Ambiental de Investigación Aplicada
-GAIA.
investigacion.energia@udes.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Eficiencia energética y auditoria energética

RESUMEN

Con el propósito de realizar una evaluación de sostenibilidad, se definió una metodología para el análisis de la eficiencia energética, enfocado en edificios universitarios, optimizando el desarrollo productivo académico y estableciendo indicadores ambientales, económicos y sociales. La metodología del presente trabajo de investigación consiste en realizar una identificación de la edificación académica, resaltando el estado general, sus elementos arquitectónicos, estudios realizados, diseños y ocupación del edificio, estableciendo y definiendo una política energética, extensión de las actividades y los límites físicos u organizacionales. Después de realizada la identificación se procede a efectuar una evaluación de desempeño energético, considerando el uso de la energía, la forma en que se consume, la intensidad energética y registrando cuando y donde es consumida la energía. Obtenida la evaluación del edificio académico, el método de Calificación Energética de Edificios Existentes, sigue los parámetros establecidos, determinando la envolvente térmica, las instalaciones de refrigeración, calefacción e iluminación, obteniendo una etiqueta automáticamente incluida en el documento de certificación, indicando la calificación asignada al edificio en diferentes escalas, que van desde la letra A (edificio más eficiente) a la letra G (edificio menos eficiente). El alcance del proyecto es analizar el resultado de la calificación energética arrojada, comprendiendo las variables que afectan el desempeño energético, señalando las posibles reducciones en el uso y los consumos significativos, analizando los impactos económicos, sociales y ambientales, relacionados en una matriz de sostenibilidad alineados con la norma energética internacional.

Palabras clave: Eficiencia energética, Edificaciones, Certificación, Sostenibilidad.

INTRODUCCIÓN

El panorama económico ha mostrado una tendencia al crecimiento constante en cuanto a la demanda de energía durante las últimas décadas. En la actualidad, la crisis mundial económica y financiera está produciendo la primera caída en el consumo de la energía global a partir de 1981. Este efecto podría ser visto como un impacto positivo para el escenario energético futuro. La [1] registra que la inversión en energía ha mostrado una tendencia a disminuir durante este periodo, desacelerado en el desarrollo de nuevos recursos y tecnologías eficientes, esta disminución es aun mas relevante para la generación de energía renovable. Dada la importancia de las principales fuentes de energías se han ido incorporando el concepto de eficiencia energética, con el propósito de optimizar el desarrollo productivo y mitigar los impactos ambientales, involucrando el proceso de sostenibilidad de las edificaciones, siendo esta eficiencia, una forma de administrar y lograr limitar el crecimiento de consumo [2]. Actualmente. Existe sistemas de evaluación de edificios utilizados en 156 países, [3] es principalmente una de las organizaciones dedicada a la certificación de proyectos de construcción sostenible. Las edificaciones presentan oportunidades significativas de economía de energía y reducción de costos a través de un gerenciamiento de la instalación, adopción de equipamientos tecnológicamente avanzados y eficientes, alteraciones de alguna característica arquitectónica, técnicas de proyecto de construcción, de los hábitos y rutinas en la edificación [4].

La Universidad de Santander – UDES, ubicada en el departamento de Santander, Colombia, es ahora la segunda más sostenible y verde de Colombia, según el más reciente ranking [5], presentado, anualmente, por la Universidad de Indonesia, ocupando el puesto 178. Esta institución tiene como objetivo tomar conciencia de su entorno y de su propio impacto al medio ambiente. Con esta investigación se busca alinear esfuerzos para continuar siendo una de las universidades sostenibles del país, desarrollando metodologías en eficiencia energética de edificaciones académicas, utilizando Indicadores técnicos considerados en procesos de certificación estandarizados y modelos computacionales para la estimación de eficiencia energética. Teniendo en cuenta esta iniciativa se quiere aportar un estudio y diagnóstico avanzado sobre el uso eficiente de la energía en las edificaciones académicas, dicho estudio se realizara en el edificio Muisca perteneciente a la facultad de Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental, con el propósito de reducir el consumo de energía y el impacto que este produce, contribuyendo a impulsar el

desarrollo social, ambiental y económico mediante la optimización de la eficiencia energética en los puntos de consumo de la universidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

La interrelación de los objetivos sociales, ambientales y económicos, no se alteran substancialmente en los veinte años que separan las conferencias de Estocolmo y la cumbre de Rio. Permanecen validas en las recomendaciones de objetivos para ocho de sus dimensiones: social, cultural, ecológica, ambiental, territorial, económica, política nacional e internacional. En cuanto las dimensiones económicas, sociales y ambientales, los objetivos de sostenibilidad fueron el trípode: preservación del potencial de la naturaleza para la producción de recursos renovables; limitación de uso de recursos no renovables; respeto y representa la capacidad de auto recuperación de los ecosistemas naturales. La figura 1, representa un esquema del concepto de sostenibilidad relacionando las tres dimensiones.

Figura 1. Trípode de Sostenibilidad. Fuente: [7]

Una evaluación de sostenibilidad debe considerar simultáneamente variables en las dimensiones ambiental, económica y social, que eventualmente dificulta sintetizar las informaciones en un único índice, como es el caso del Índice de Desarrollo Humano – IDH [6].

CE3X es la nueva herramienta informática para la Certificación Energética de Edificios Existentes, desarrollado por Efinovatic y el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), del ministerio de España. Este programa logra certificar de una manera simplificada todo tipo de edificación siendo la base dicho procedimiento, logra obtener una etiqueta automáticamente incluida en el documento de certificación, indicando la calificación asignada al edificio en diferentes escalas, va desde la letra A (edificio más eficiente) a la letra G (edificio menos eficiente). La herramienta incorpora

un conjunto de medidas en los procesos de eficiencia energética, realizando también un estudio económico basado en ahorros energéticos estimados, siendo los valores de consumo los datos de entrada para la calificación energética, tales como; sistemas de solo calefacción, sistemas de solo refrigeración, sistema de calefacción y refrigeración, contribuciones energéticas, sistema de iluminación, sistema de ventilación (aire primario), ventiladores, equipos de bombeo y torres de refrigeración.

Metodología para el análisis de eficiencia energética

La metodología determinada se llevó a cabo en dos fases, una exploratoria y posteriormente una descriptiva, presentando las características de los métodos de evaluación de sostenibilidad en las edificaciones, identificando el método, mostrando con claridad los aspectos de una edificación académica. Siendo posible establecer una matriz de evaluación de sostenibilidad con los indicadores del método elegido. A seguir, se realizó un estudio de caso con la evaluación de desempeño energético y sostenible en una edificación de la Universidad de Santander – UDES, en el campus universitario lagos del cacique presentando su comportamiento. El proceso ilustrado en la figura 2, representa las fases de la metodología del proyecto de investigación, y a seguir se describe cada una de ellas.

Figura 2. Metodología para el análisis de eficiencia energética en edificios universitarios.

Levantamiento Bibliográfico

Siguiendo el cumplimiento a figura 2, se realizó un levantamiento bibliográfico de indicadores de sosteni-

bilidad, utilizados para evaluar sistemas prediales. La cantidad de indicadores encontrados en la literatura es significativa. Siendo necesario reducir este número para no tornar la matriz de análisis compleja, se consideró indicadores propuestos en procedimientos de certificaciones recientes. Adicionalmente, se optó por agrupar los indicadores conforme a las dimensiones de sostenibilidad.

Caracterización de los métodos de evaluación de las edificaciones

En la fase de caracterizar los métodos de evaluación de las edificaciones fueron descritos de forma detallada y comparada, identificando, además, de su origen, también su estructura metodológica, las organizaciones intrínsecas y los procedimientos de aplicación. Debido al elevado número de métodos de evaluación existentes, fueron tratados en este trabajo, los más representativos en el contexto internacional.

Selección del método de evaluación de edificaciones

La selección del método de evaluación de edificaciones, se realizó de acuerdo a los aspectos a evaluar en la edificación, siendo este el apropiado dependiendo de la condiciones específicas del edificio de la Universidad de Santander-UEDES.

Caracterización de los indicadores de sustentabilidad y eficiencia energética

La caracterización de los indicadores de sustentabilidad y eficiencia energética del método seleccionado, fueron descritas para organizar la matriz de sustentabilidad permitiendo relacionar los tres pilares.

Análisis de los datos energéticos

Luego de la calificación arrojada por el método se analizaron los datos energéticos, los cuales ayudan a comprender las variables que afectan el desempeño energético y la tendencia del consumo de energía. Este análisis también permitió identificar las posibles reducciones en el uso, y los consumos significativos.

El estudio de caso

El estudio de caso se basó en el análisis de el edificio Muisca, ubicado en el campus de la Universidad de Santander “UEDES” Bucaramanga, en el barrio Lagos del Cacique más con las coordenadas 7° 6’ 20.95” N y 73° 5’ 40.76” O. conviene resaltar que no se pretende certificar la edificación estudiada, pero si indicar los aspectos más relevantes a ser considerados en la op-

timización de los pilares económicos, ambientales y sociales de futuras certificaciones.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La investigación realizada acerca de la evaluación energética del edificio Muisca de la universidad de Santander, arrojo diferentes resultados obtenidos por medio del simulador CE3X ilustrados en la figura 3, y la evaluación de construcción de sostenibilidad mediante la aplicación de la matriz propuesta.

Figura 3. Calificación energética actual del edificio muisca. Fuente: [8]

El informe final del programa CE3X muestra la calificación de eficiencia energética del edificio evaluado de acuerdo con los datos actuales activos de consumo de energía. Teniendo en cuenta tanto los elementos de construcción como el equipo, el programa determina los valores que se utilizaron para caracterizar el comportamiento de los ocupantes, los sistemas de iluminación, ventilación y refrigeración. Con un rendimiento energético actual, el edificio es clasificado y posicionado en el nivel D con un indicador de más de 53.5 kilogramos de CO2 por metro cuadrado (kgCO2/m2) [8].

Siguiendo los parámetros propuestos por la ISO 50001 [9], se hizo énfasis en mejorar y reestablecer la administración de la energía consumible, dando como resultado un proceso sistematizado que planifica el dominio y manejo actual de fuentes de energía.

En la matriz de sostenibilidad descrita en la tabla 1, la dimensión social contempla criterios para evaluar el confort higrotermico, acústico, visual, olfativo y la calidad sanitaria del agua. El pilar económico cuenta con un indicador que mide los productos integrados, sistemas y procesos de construcción, el cual considera todas las instalaciones de mantenimiento de la calidad y el rendimiento técnico en uso, con criterios económicos y arquitectónicos de carácter social, teniendo como objetivo principal lograr la reducción de

los costos operacionales, la durabilidad y eficiencia de las inversiones.

La extensión ambiental emplea indicadores como; construcción de la relación con su entorno, obra de construcción de bajo impacto ambiental, administración de energía, gestión del agua, uso de la gestión de residuos y operación del edificio, mantenimiento y permanencia del desempeño ambiental, calidad sanitaria del medio ambiente y calidad del aire.

Tabla 1. Matriz de Sostenibilidad del Edificio Muisca de la Universidad de Santander - UDES.

MATRIZ DE SOSTENIBILIDAD					
Fecha: Abril del 2016					
POLÍTICA	DIMENSIÓN	INDICADOR Bueno	CALIFICACIÓN		
			Superior	Excelente	
El programa de ingeniería civil, de la Universidad de Santander – UDES, tiene como política energética, asumir el compromiso de utilizar eficientemente la energía del edificio MUISCA y actividades con el propósito de contribuir a mitigar los efectos del cambio climático y mejorar su posicionamiento competitivo, impulsando programas de sistemas energéticos, apoyados en un personal competente y comprometido, para el mejoramiento continuo de su sistema de gestión de la energía.	ECONOMICO	Ambiental	Productos Integrados, Sistemas y Procesos de Construcción	X	
		Social	Control Consumo Eléctrico		X
		Social	Control Consumo Refrigeración		X
		Social	Control Consumo Ventilación	X	
		Social	Control Consumo Iluminación		X
		Social - Ambiental	Gastos por consumo Energético	X	
	SOCIAL	Ambiental	Confort Higrotermico	X	
		Ambiental	Confort Acústico	X	
		Ambiental	Confort Visual		X
		Ambiental	Confort Olfativo	X	
		Ambiental	Calidad Sanitaria del Agua		X
	AMBIENTAL	Social	Construcción de la Relación con su Entorno		X
		Social	Obra de Construcción de Bajo Impacto Ambiental	X	
		Económico	La Administración de Energía	X	
		Económico	Gestión del Agua		X
		Social	Uso de la Gestión de Residuos y Operación del Edificio	X	
		—	Mantenimiento - Permanencia Desempeño Ambiental	X	
		Social	Calidad Sanitaria del Medio Ambiente	X	
		Social	La Calidad del Aire	X	

Además pretende acotar el consumo de energía y manejar el suministro de aguas pluviales y residuales definiendo los procesos alternativos de gestión de consumo durante la construcción e implementación del sistema de gestión de la energía. Con base a la política energética definida se estima la proyección en un escenario óptimo esperado, mejorando los valores de consumo energéticos.

CONCLUSIONES

Con la metodología aplicada al estudio de caso, se demostró la importancia sobre el uso y el consumo de la energía, haciéndose visibles los beneficios de poder aplicar los parámetros mencionados con anterioridad, proporcionando no solo a edificaciones académicas, sino también, haciendo partícipes a cualquier organización, sea cual sea su tamaño o actividad, independientemente de su ubicación geográfica, conduciendo a las edificaciones a mejorar el rendimiento energético, a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, a disminuir el costo de la energía, y otros impactos ambientales relacionados. La principal contribución del presente trabajo consiste en la atenuación de la subjetividad en la evaluación de sostenibilidad mediante el uso de indicadores cuantificados y calificados para evaluación de eficiencia energética. Fue posible presentar los conceptos de sustentabilidad y eficiencia energética en el ámbito de las edificaciones y su aplicación en la evaluación de los sistemas académicos, a fin de contextualizar el tema de evaluación de la sostenibilidad en edificaciones, los cuales muestran que el uso de los indicadores evalúa las características de consumo, identifica las prácticas ambientales y permite mejorar la eficiencia energética en la edificación. Teniendo establecidos los indicadores, se procede a formular planes de acción donde se reconoce la mejora pertinente del desempeño energético del edificio, siendo esta la base para los planes de acción. Definiendo los tiempos de ejecución de cada etapa, identificando

y asignando funciones, así mismo la destinación de recursos, calculando los esfuerzos, costos, beneficios sociales y ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Energy Agency, «Excerpt From: Energy Balances of OECD Countries,» IES's, 2015.
- [2] G. C. & V. Marc, «Modeling the Impacts of Climate Change on the Energy Sector: a Swiss perspective,» pp. 1 - 25, 25 Junio 2012.
- [3] World Green Building Council, «Impact Report,» 2014.
- [4] T. Waas, J. Hugé, T. Block, T. Wright y F. B.-C. & A. Verbruggen, «Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-Making Strategy for Sustainable Development,» *Sustainability*, pp. 5512 - 5534, 2014.
- [5] UI Green Metric , «UI GreenMetric Ranking : University of Nottingham is The World's Best Green Campus,» 13 04 2015. [En línea]. Available: <http://greenmetric.ui.ac.id/>.
- [6] J. E. D. Veiga, «Indicadores de sustentabilidade USP (FEA/USP),» Faculdade de Economia e Administração da, Sao Paulo, 2010.
- [7] M. S. D. Ramos, M. A. R. Ascanio y J. A. D. M. & J. D. Barbosa, «Evaluación de sustentabilidad: Análisis de Eficiencia Energética en edificaciones de instituciones académicas,» CONSTRUIBLE.ES, Madrid - España, 2016.
- [8] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Manual de usuario de calificación energética de edificios existentes CE3X, Madrid, España: IDAE, 2012.
- [9] ICONTEC INTERNACIONAL, *Norma Técnica Colombiana ISO - 50001*, Bogotá D.C.: ICONTEC, 2011.

MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA PRODUCTIVO MIPYME EN FUNCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Prieto Amado, Andres Felipe¹

¹Universidad Cooperativa de Colombia, Grupo Ingenio Induspymes
andresf.prieto@hotmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Eficiencia y auditoría energética

RESUMEN

Como quinta industria en energía eléctrica consumida y segunda en personal remunerado permanentemente, la industria de fabricación de productos plásticos tiene una posición significativa en el entorno económico colombiano. A pesar de ello, desde la perspectiva energética, las políticas estatales carecen de un objetivo claro ante la ausencia de caracterización del sector, específicamente en relación a la participación industrial de Mipymes, mostrando incongruencias como en el caso del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales – PROURE 2010-2015 adelantado por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, donde visiones contradictorias, sugieren la falta de argumentos de sostenibilidad energética, favoreciendo la gestión de políticas genéricas sobre aquellas específicas que contribuirían favorablemente al crecimiento sostenible de organizaciones Mipyme, reduciendo cargas administrativas posteriores. Es así como en el marco del análisis de caso de una organización Mipyme y como modelo de desarrollo sostenible en organizaciones Energéticamente Intensivas, se diseñaron e implementaron estrategias para la recolección de datos (Metodología de Observación y Registro en Paralelo-MORP) y análisis energético (Metodología Integrada para el Análisis de la Información-MIAI), como aproximaciones de fácil implementación, bajo nivel tecnológico y alta reproducibilidad en industrias del sector, sugiriendo cambios metodológicos sobre tecnológicos en la mejora de indicadores de Eficiencia Energética.

Palabras claves: Eficiencia Energética, Programación Lineal, Mipymes

INTRODUCCIÓN

En el marco de la investigación “Formulación de modelos de producción para empresas manufactureras de plásticos en Bogotá basados en factores de Uso Racional de la Energía – URE”, y teniendo como referente el trabajo llevado a cabo en “Caracterización del comportamiento del sector industrial de pymes que procesan formas básicas de plástico en Bogotá, en función del consumo de energía eléctrica” [1], el objetivo de este trabajo investigativo fue abordar con profundidad el análisis energético de una organización de manufactura de productos plásticos que utiliza el proceso Energéticamente Intensivo de Moldeo por Inyección, llenando los vacíos conceptuales identificados en el estudio sobre la eficiencia energética en la industria de transformación de plásticos, *Situación energética general del sector de los plásticos en Bogotá* [2], en referencia a la ausencia del análisis del moldeo por inyección como tipo de procesamiento de plásticos. Ampliando en el análisis energético como base para la generación de una Metodología de Análisis de Sistemas Productivos se presenta una estrategia de fácil aplicación y reproducibilidad en organizaciones Energéticamente Intensivas que tiene en consideración la incidencia energética de las variables de cada uno de los factores de producción en el consumo energético total, como resultados finales de la primera parte de la investigación llevada a cabo [3].

Los objetivos en este trabajo investigativo se desarrollaron entorno a la creación de una Metodología de Análisis de Sistemas Productivos Energéticamente Intensivos, el primer objetivo fue la construcción de una metodología de observación y registro, Metodología de Observación y Registro en Paralelo-MORP, que permitiera obtener la carga de datos productivos y energéticos de este tipo de organizaciones con características reproducibles para industrias similares, el segundo objetivo fue el desarrollo de una metodología de análisis que integrara la carga analítica obtenida, Metodología Integrada para el Análisis de la Información-MIAI, identificando los eventos de producción que mayor incidencia tienen en la dinámica organizacional y su consecuencia en el desempeño energético de la organización, mediante la aplicación de la metodología de coeficiente correlación estadística muestral de Pearson [4], la metodología de análisis general establecida servirá para la formulación de un modelo lineal como una herramienta de optimización construida a partir de las políticas organizacionales y el desempeño de los factores de producción más representativos [5], que integrando la carga analítica organizacional evidenciara las relaciones productivas de mayor inte-

rés desde la perspectiva energética, identificando las oportunidades energéticas para la creación de una política de gestión, optimizando el sistema en función del consumo energético.

Siendo la séptima industria colombiana según el indicador de Producción Bruta en [6], el sector de fabricación de productos plásticos en el periodo 2011-2014 tomo un mayor protagonismo como el tercer grupo Industrial en personal ocupado y número de establecimientos 7,6% y 7,2% respectivamente, segundo en personal remunerado permanente 7,7%, como señal de estabilidad laboral y quinto en energía eléctrica consumida con 1.173,4 GWh, cerca de 7,4% del total industrial nacional, después de industrias mineras [6], convirtiéndose en un referente industrial desde múltiples perspectivas productivas, debido al nivel técnico propio de los procesos de manufactura empleados, energéticamente intensivos y de grandes volúmenes de producción por su carácter repetitivo.

A pesar de la importancia del sector de fabricación de productos plásticos, la caracterización energética del mismo es incompleta en referencia a la participación de las Mipymes en este, aun hoy no existen datos concretos acerca de la importancia industrial y su contribución particular al consumo energético [7], que en un entorno de manufactura de grandes volúmenes de producción y consumos energéticos elevados por unidad producida (kWh/unidad) se muestran como un componente significativo a ser evaluado; declaraciones llevadas a cabo en 2009 por el Ministerio de Minas y Energía identificaban que

“...no se conoce el potencial al momento de mejorar la productividad y competitividad de los centros productivos a través de la gestión de la energía y la aplicación de conceptos de eficiencia energética y que el potencial del instrumento de desarrollo de la productividad y competitividad de la pequeña y mediana empresa – PYME, no ha sido calculado” [1].

Estas afirmaciones se produjeron en la concepción de iniciativas como el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales – PROURE 2010- 2015 [8] adelantado por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, que en ausencia de información precisa acerca de la dinámica de las Mipymes en el sector de la manufactura de productos plásticos, sugieren que su construcción estuvo basada en estimaciones incompletas y por ende proyecto estrategias contradictorias en relación a la administración energética y el uso racional y eficiente de la energía eléctrica, visiones como la evidenciada en el Subprograma Sectorial de este programa, Línea de Ac-

ción Prioritaria, donde la prioridad de la *Gestión de la energía en la industria* fue alta, a diferencia de otras líneas como la del *Uso racional y eficiente de la energía en Pymes*, que recibieron un nivel de priorización bajo, se muestran como evidencia de las contradicciones en las políticas desarrolladas, con las consecuencias económicas y de inversión que esto conllevaba, excluyendo la creación de políticas de gestión energética y productiva específicas y su aplicación en Mipymes del sector de la manufactura de productos plásticos, ausencia que se convierte en una carga administrativa para aquellas organizaciones que superen la etapa introductoria, debido a que la falta de desarrollo en paralelo de estrategias de gestión energética con el crecimiento organizacional, será visto después como barreras administrativas y productivas y no como como estrategias de desarrollo sostenible.

La integración de las variables productivas y energéticas en búsqueda de la eficiencia energética como primera aproximación a la gestión energética organizacional [9], opta por implementar cambios metodológicos antes que tecnológicos en la optimización de los recursos de las Mipymes, proyectando un crecimiento basado en metodologías optimizadas, direccionando estratégicamente la organización.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Metodología de Análisis de Sistemas Productivos se desarrolló en el marco de un análisis de caso de la organización energéticamente intensiva de manufactura de productos plásticos de moldeo por inyección, como investigación experimental, su diseño e implementación se llevó a cabo en conjunto con el análisis del sistema productivo y fue contemplada como una estrategia de fácil aplicación y reproducibilidad en organizaciones energéticamente intensivas, en 4 fases secuenciales la Metodología de Análisis de Sistemas Productivos busca establecer un método preciso y organizado que permita identificar y caracterizar cualquier industria estudiada y que sirva de insumo para la construcción de un modelo matemático de optimización en relación al consumo energético del sistema productivo [3].

Descripción Unidad de análisis

Con la descripción de la unidad de análisis se caracteriza la organización desde 8 perspectivas que permiten identificar las actividades productivas y comerciales de la organización, con un enfoque en la descripción productiva y energética, que permite direccionar el análisis energético.

- Perfil administrativo
- Cultura Organizacional
- Desempeño Financiero
- Estrategia Comercial
- Nivel Tecnológico de la Industria
- Desempeño Ambiental y Ocupacional
- Descripción Productiva
- Descripción energética

Variables

Con la identificación de las actividades productivas, se procede a definir las Variables Productivas en los factores de producción presentes y de forma específica se establecen las Variables Energéticas a monitorear como medida de análisis en paralelo de la influencia productiva.

Tabla 1. Variables del sistema de producción

Variables	Factor de Producción	Cantidad
Variables Productivas	Materia Prima	13
	Maquinaria	16
	Mano de Obra	1
	Organizacionales	6
Variables Energéticas	Energía	15

Metodología de Observación y Registro en Paralelo-MORP

La Metodología de Observación y Registro en Paralelo-MORP, en 3 niveles de análisis y bajo una estructura específica en paralelo establece una aproximación adecuada para la estrategia de observación y recolección de información de sistema energéticamente intensivos, para identificar y orientar los datos obtenidos para su posterior análisis; Las perspectivas del proceso de análisis del sistema, son uan aproximación análoga a la metodología utilizada por Silva Larrotta y Porras Rey en [2], abordando de forma detallada la afectación e incidencia energética específica del comportamiento de las diferentes variables en los factores de producción (mano de obra, materia prima y capital -maquinaria y herramientas-), desde la perspectiva productiva, la metodología se enfoca en el comportamiento de las actividades en la manufactura, Métodos, Materia Prima y Mano de Obra y desde la perspectiva energética, evalúa la influencia de la utilización de este recurso, su comportamiento y consecuencias en la utilización y consumo energético de los Componentes Energéticos instalados -Maquinaria y equipos eléctricos-, permitiendo caracterizar en simultaneo el sistema e interpretar su comportamiento energético y productivo.

Nivel 1 Identificación y caracterización: Identificación de los Componentes Energéticos (maquinaria y equipo que utilicen el recurso energético) utilizados en las actividades productivas del sistema y caracterización de los eventos que describen las actividades productivas, Eventos Productivos – EP.

Nivel 2 Medios Tecnológicos y Formatos productivos: En este nivel se procede a evaluar los medios tecnológicos necesarios para intervenir, monitorear y registrar las variables energéticas establecidas para el análisis de los Componentes Energéticos y se construye un Formato de Observación y Registro Sistema Productivo como medida de seguimiento de la dinámica de producción.

Analizador Eléctrico Multifunción

Las necesidades de monitoreo energético y análisis eléctrico sugieren la utilización de un medio tecnológico para la medición, transmisión y almacenaje de registros eléctricos en una computadora, el Dispositivo ABB ANR96-230 Analizador Eléctrico Multifunción, como un instrumento electrónico de medición diseñado para monitorear, almacenar y analizar todas las variables energéticas en una línea de distribución, acompañado por el software de registro y seguimiento de datos ABB SACE S.p.A 2003 SW.-128 versión 4.12 que operando en conjunto permiten llevar a cabo las tareas de monitoreo y registro de las variables energéticas en el sistema.

Formato de Observación y Registro Sistema Productivo

La utilización, soportando la perspectiva productiva para la obtención de datos de un formato de observación y registro permite establecer las variables con mejor ajuste al sistema, de uso exclusivo en los Componentes Energéticos del Sistema Productivo que mayor variación de sucesos de producción presentan desde el enfoque del consumo energético, el formato diseñado permite realizar el ejercicio de recolección de datos productivos, llevando un registro completo de la dinámica de los sucesos de producción.

Nivel 3 Observación y registro: Caracterizado por su flexibilidad, este nivel mantiene la estructura en paralelo de la Metodología de Observación y Registro en Paralelo - MORP, estableciendo la programación de obtención de datos, los niveles de muestreo estadístico necesarios y la frecuencia de registro de los parámetros energéticos y productivos para el análisis ener-

gético posterior, apoyándose en medios tecnológicos desde la perspectiva energética para el análisis y monitoreo de las variables energéticas y en el formato de observación y registro para los acontecimientos productivos específicos.

Metodología Integrada para el Análisis de la Información – MIAI

La Metodología Integrada para el Análisis de la Información – MIAI, es una metodología de análisis de la información en sistemas energéticamente intensivos que confronta en paralelo registros productivos con energéticos. Desde lo genérico a lo específico, el análisis incluye la descripción en 5 escalas jerárquicas de los cambios y variaciones energéticas del sistema, en base a la magnitud de cada una frente al sistema productivo general, inicialmente por sus características productivas y energéticas en Sesiones de Observación y Registro – SOR, luego con la caracterización de los escenarios de análisis energético basados en la utilización de la maquinaria disponible, Escenarios Energéticos de Producción – EEP, las ultimas 3 escalas jerárquicas se integran como los Eventos de Producción – EP descritos en el primer nivel de la Metodología de Observación y Registro en Paralelo-MORP, *Identificación y caracterización*, las características de las cargas de Materia Prima inicialmente y el análisis de los Sucesos de Producción como descripción del estado actual de la maquinaria activa y finalmente los Ajustes de maquinaria identificados como la escala inferior de incidencia energética la Figura 1. A continuación muestra la estructura jerárquica de análisis tras la implementación de la Metodología Integrada para el Análisis de la Información – MIAI.

Figura 1. Metodología Integrada para el Análisis de la Información-MIAI

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En comparación con el estudio de Silva Larrotta y Porras Rey [2] la profundización en el análisis de influencia energética de los Eventos de Producción – EP de un sistema energéticamente activo, consolida, amplía y desarrolla positivamente la noción de Administración Energética en Mipymes Energéticamente Intensivas, la construcción de una metodología que integra la recolección y análisis de información productiva y energética para la generación de un modelo matemático como medida de optimización teniendo como objetivo parámetros de eficiencia energética, se muestra como una herramienta altamente reproducible en la generación de políticas de gestión energética en sistema productivos basados en el eficiente uso de los recursos disponibles, sensibles a su manipulación y asignación; los resultados evidencian la fortaleza de la estructura metodológica sugiriendo su aplicación en industrias de mayor tamaño, donde tendrían un mayor impacto económico desde la perspectiva de la mejora de indicadores de eficiencia energética, la comparación con el estado metodológico inicial en la organización, advierte sobre la importancia de establecer una Línea de Base Energética como parámetro de comparación energética y seguimiento al consumo energético en estas organizaciones [9].

En relación a análisis similares como el de Nova Arévalo en [1], el enfoque en variables del ejercicio productivo y variables energéticas contrario a las de gestión organizacional referenciadas allí, enriquece la construcción de metodologías de modelamiento matemático desde una perspectiva más cercana a la dinámica de producción, evidenciando la flexibilidad de la formulación y modelamiento de sistema productivos Mipyme. De forma específica, la versatilidad de la metodología diseñada llena el vacío metodológico operacional en las estrategias de análisis integral y generación de políticas de eficiencia energética, como una herramienta de fácil aplicación y reproducibilidad.

CONCLUSIONES

Las mediciones, caracterizaciones y aplicación de la metodología diseñada en una industria en funcionamiento permiten describir la relación de los sucesos de producción y el consumo energético directamente, en tiempo real, siendo la inflexibilidad de la implementación de análisis teóricos uno de los retos principales en la implementación de metodologías de evaluación de eficiencia energética a nivel organizacional [10], de-

bido a que en la búsqueda de mejoras en la eficiencia energética, la mayoría de análisis se centran en el desarrollo y mejoramiento de tecnologías para grandes organizaciones [11] y no en el cambio de metodologías para pequeños productores, donde las actividades artesanales toman un mayor protagonismo y las prioridades administrativas son diametralmente opuestas a aquellas utilizadas en industrias de mayor tamaño, en estas, la correcta planeación, precisión metodológica, e implementación de estrategias de alto impacto y bajo costo reducen el riesgo de mortalidad organizacional mostrándose como el camino a seguir. La efectividad de estrategias de sencilla aplicación y gran impacto en el desarrollo de políticas enfocadas a la eficiencia energética, contribuyen a eliminar el paradigma de la aplicación de metodologías de optimización en pequeñas industrias frente al dilema de la rentabilidad.

REFERENCIAS

- [1] N. A. Nova Arévalo, «Caracterización del comportamiento del sector industrial de pymes que procesan formas básicas de plástico en Bogotá, en función del consumo de energía eléctrica,» de *7a. Jornada de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, Bogota D.C., 2011.
- [2] J. R. Silva Larrotta y G. O. Porras Rey, «Situación Energética general del sector de los plásticos en Bogotá,» *Revista de Ingeniería*, vol. Volumen 13, nº Fascículo 8, pp. p.58-65, 2001.
- [3] A. Prieto, «Programa Lineal para la Optimización de la producción en función del consumo energético,» de *2nd Congr. Int. Desarrollo Sostenible y 3rd Encuentro Int. Semilleros de Investigación*, Ibagué, Colombia, 2016.
- [4] A. V. Hill, *The Encyclopedia of Operations Management*, Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Educations, Inc., 2012.
- [5] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, «Introducción a la Investigación de Operaciones,» de *Introduction to Operations Research*, 9 ed., México, D.F., McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2010, p. 978.
- [6] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, «Encuesta Anual Manufacturera - EAM,» Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, Bogotá D.C., 2015.
- [7] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, «Encuesta de Microestablecimientos - MICRO,» Boletín de Prensa Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Bogotá D.C., 2013.

[8] Republica de Colombia - Ministerio de Minas y Energia MME, «Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales - PROURE,» Ministerio de Minas y Energia - MME, Bogota D.C, 2010.

[9] Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion NTC-ISO 50001, Sistemas de Gestion de la Energia. Requisitos con orientacion para su uso NTC-ISO 50001, Bogota D.C.: ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion, 2011, p. 25.

[10] D. W. Li, Efficiency of Manufacturing Processes - Energy and Ecological Perspectives, C. Herrmann y S. Kara, Edits., Springer International Publishing Switzerland, 2015, p. 189.

[11] E. Müller, R. Schilligb, T. Stock y M. Schmeiler, «Improvement of injection moulding processes by using dual energy signatures,» de *Variety Management in Manufacturing. Proceedings 47th CIRP Conf. Manufacturing Systems*, 2014.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL PROCESO DE TEÑIDO DE LA TINTORERÍA ASITEX S.A.

Bernal Rodríguez, Wendy¹
Narváez Reyes, Ana Isabel¹
Tolosa Blanco, Lyzed Arelis¹
Ariza Cubides Fernando¹

¹ Universidad Central- Grupo de Agua y Desarrollo Sostenible
ltolozab@ucentral.edu.co

ÁREA TEMÁTICA

Eficiencia y auditoría energética.

RESUMEN

La industria textil demanda gran cantidad de energía en sus procesos pilares de hiladura, tejidura, teñido y acabados. Los dos primeros demandan energía eléctrica (58,9% de la energía la consume el procesamiento del algodón, el porcentaje restante corresponde a otras fibras), mientras que el tercero consume energía térmica (74% de la energía la consume el procesamiento del algodón, el porcentaje restante corresponde a otras fibras) [1]. Mediante un diagnóstico preliminar, mediciones indirectas del consumo energético en tiempo real, análisis de principios de ingeniería verde y la integración energética del procesos. Fue posible evidenciar que el procesamiento de algodón teñido consume un gran porcentaje de energía térmica con respecto a la energía eléctrica (83% / 17%), sin embargo, realizando el análisis en las máquinas de teñido la proporción es notablemente menor de la energía térmica a la eléctrica (36% / 64%); evidenciando que existen pérdidas de energía térmica importantes entre el generador (caldera) y el consumidor (máquinas de teñido). Por lo cual se estableció la propuesta de recuperación energética de los residuos del proceso.

Palabras claves: Desempeño ambiental, eficiencia energética, integración energética, industria textil,

INTRODUCCIÓN

La industria textil demanda una gran cantidad de energía térmica para procesos de pre-tratamiento y tinte, operaciones de secado, planchado, entre otras. Además del requerimiento de energía eléctrica para el funcionamiento de la maquinaria y el suministro de otros servicios. El consumo energético depende del material que se manipule, los químicos que se utilicen, y la cantidad del material que se debe procesar, por lo cual es necesaria la implementación de nuevas estrategias que permitan la reducción de la demanda energética en este tipo de procesos [2].

Esta actividad textil genera impactos ambientales negativos que deterioran la calidad ambiental en sus zonas de influencia, conllevando al deterioro de la calidad de vida de las personas por exposición a la contaminación y de la misma forma realizando un gran aporte a la problemática ambiental nacional. Teniendo en cuenta las normas ISO 14031 acerca de desempeño ambiental [3], e ISO 50001 acerca de eficiencia energética [4], se hace relevante que las industrias textiles deban tener la responsabilidad social de adoptar medidas de ahorro energético tales como reutilización de los residuos, vertimientos y emisiones de sus procesos, contribuyendo a la optimización de consumo de los recursos energéticos, ya que una de las principales problemáticas del sector textil, se dan a partir de la ineficiencia en el proceso de teñido, principalmente en el proceso de retintado, el que genera un alto consumo de agua y materias primas; lo cual implica repetir una etapa del proceso con alto consumo de energía térmica y eléctrica.[5].

La evaluación del desempeño ambiental del consumo energético en el proceso de teñido, se realizó para la fibra de algodón en color blanco y en las máquinas de teñido, que representan el mayor consumo de energía para un periodo específico de tiempo de producción en la empresa, esta evaluación se realizó a través de la implementación de indicadores de desempeño ambiental, la aplicación de la teoría de integración de procesos y del análisis de los principios de Ingeniería verde, para proponer las recomendaciones técnicas a la empresa en cuanto al correcto aprovechamiento de la eficiencia de la tecnología (maquinaria de teñido instalada) y el uso de los recursos en el proceso de teñido de tela de algodón de la empresa Asitex S.A., contribuyendo a la optimización de los recursos energéticos y a la promoción de la responsabilidad social empresarial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diagnóstico preliminar

Inicialmente se elaboró un diagnóstico preliminar de la etapa de teñido en términos de la eficiencia energética, mediante la estimación del consumo y capacidad energética de la empresa. También se realizó la medición en tiempo real del consumo de energía eléctrica, en las máquinas de teñido que representan el mayor porcentaje de producción de tela de algodón teñida en la empresa, mediante un método de medición indirecto, éstas se realizaron en el cable totalizador de consumo de la máquina de teñido en las operaciones más relevantes del proceso como: calentamientos, enfriamientos y adición de materias primas. El consumo de energía térmica en cada máquina se estimó mediante las variaciones de temperatura y masa de tela del proceso, en los programas que consumen vapor en la etapa de teñido, durante este trabajo en campo se evidencio que las máquinas de teñido no tienen instrumentación de control para realizar la medición directa del consumo de vapor, sin embargo, éste se estimó a partir de las buenas prácticas de diseño de este tipo de instalaciones. Para este análisis también se requirió de la elaboración los respectivos diagramas del proceso de teñido como lo son; el diagrama de bloques (DB) y el diagrama de flujo de proceso (PFD), con lo cual se logró identificar las variables y condiciones de operación más representativas del proceso.

Costos de producción

Posteriormente, se determinaron los costos de producción por medio de la metodología establecida por M. Brambila [6]. Para llevar a cabo la evaluación del desempeño ambiental, se implementaron indicadores de desempeño operacional bajo los criterios establecidos en la norma ISO 14031 del año 2000; adicionalmente, se realizó un análisis del consumo energético bajo los principios cuatro y diez de la ingeniería verde, complementados con los de química verde que también están relacionados con la eficiencia en los procesos. Finalmente, se realizó un análisis de integración de procesos a través del uso de la metodología de "Pinch Point" [7], que permitió cuantificar el proceso en términos de eficiencia energética y formular la propuesta final de mejoramiento.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Análisis de Consumo de Servicios y gastos en producción

Se realizó un análisis de producción el cual permitió definir el alcance de la investigación, este análisis inicial mostro que la fibra de mayor producción era el algodón en color blanco (53%) como se observa en la Figura 1, pero para efectos de la investigación se analizaron tres tonos diferentes blanco, medio y oscuro; también se estableció que se estudiarían las máquinas de teñido de mayor producción, las cuales representan el 82% de la producción de tela teñida.

Figura 1. Producción total por color de algodón procesado (Kg) Enero-Febrero (2015).

Paralelamente, se estimaron los consumos de servicios como se observa en la Figura 2, lo cual permitió identificar que la empresa consume tres servicios que son agua, electricidad y gas natural. El consumo de energía térmica representa el 83.2% del consumo total energético de la empresa, el consumo de energía eléctrica representa el 16.8%, con respecto al consumo de agua este finalmente hace parte de la energía térmica del proceso de teñido. Un estudio energético en la industria textil realizado en Perú por parte del Ministerio de energía y minas, estimó los consumos por área del proceso textil donde se concluyó que efectivamente el proceso de tintorería y acabados representan el mayor consumo energético, con respecto al proceso de teñido, este último demanda el mayor porcentaje de energía térmica [8].

(a)

Energía Eléctrica: 3'586.182

(b)

Figura 2. (a) Estimación del consumo energético de la empresa (KWh) y (b) Distribución de costos promedio en servicios públicos periodo 2011-2014.

Análisis de la Capacidad de Producción

Para el proceso productivo la empresa cuenta con tres calderas, dos de ellas tienen una capacidad de 700 BHP, como se muestra en la Tabla 1; cada una y cuentan adicionalmente con una caldera de aceite térmico de 355 BHP; para el suministro de energía eléctrica cuenta con una subestación eléctrica de 1.630 KVA.

Tabla 1. Capacidades de las calderas en KW y BHP

Calderas	capacidad		consumo de gas natural promedio (nm3)	consumo energético (kwh)*
	BHP	KW		
Caldera 1 - Vapor	700	6.867	290.882	2'859.867
Caldera 2 - Vapor	700	6.867		
Caldera 3 – Aceite térmico	355	3.488	73.875	726.315
Capacidad total	1.755	17.222	364.757	3'586.182

El estudio energético mostró que el proceso tiene una capacidad máxima de transporte térmico de 10.358 KW (96%) de 10.790 KW, de lo cual solo consumo. Cada proceso de teñido consiste en llevar la mezcla a temperaturas específicas, mediante la variación de los gradientes (°C/min). Los mayores consumos energéticos se dan en los procesos de teñido en colores medio y oscuro, esto es debido al color ya que, para colores como los negros y medios, el consumo aumenta debido a que las variaciones de temperatura son mayores, así como la cantidad de agua requerida para los lavados. El consumo de energía eléctrica se obtuvo por mediciones en tiempo real, el factor de potencia de la subestación eléctrica (0.71) y los equipos de funcionamiento de cada máquina como se observa en la Figura 3, estableciendo un consumo promedio de 75 KWh.

Figura 3. Consumo de energía térmica (KWh), Máquina 27.

Análisis de Indicadores operacionales

Los tipos de indicadores son los de consumo variable que son ineficientes ya que el indicador de consumo de agua es muy alto, al igual que el indicador de consumo de gas natural; los de consumo específico, que corresponde a la figura 5 a la energía eléctrica y térmica es alto con respecto a los valores de referencia y eficiencia, que son los de tiempo de operación muestran que el tiempo real del proceso supera al tiempo teórico, y que los turnos de la tarde y la noche son los más ineficientes. Durante el tiempo de seguimiento las maquinas teñido funcionan a su máxima capacidad, así la carga de tela no esté al máximo; es por esto que existen estas ineficiencias.

(a)

Análisis de costos de producción y ahorros en la propuesta

Los costos de producción se estimaron por un mes para conocer el estado de la empresa frente al proceso de teñido. Para ello se tomaron los costos fijos como lo son el mantenimiento de equipos, la mano de obra, los servicios y, los costos variables como los de las telas, colorantes, insumos químicos, con un total de producción por mes de COP \$1.893'841.904; mientras que para la estimación de los costos de ineficiencia

(b)

Figura 4. (a) Indicador consumo de energía eléctrica por máquina y (b) Indicador consumo de energía térmica por máquina

La evaluación de los principios de ingeniería verde: el cuatro que dice que los productos, procesos y sistemas deberían diseñarse para la maximización de la eficiencia en el uso de materia, energía y espacio, y diez que habla del cierre los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible; y los de la química verde: el principio once que establece el análisis de proceso en tiempo real, y el principio seis que trata el diseño para la eficiencia energética [9]. Permitieron identificar puntos críticos en la entrada de agua a la caldera y el aprovechamiento energético, los tiempos de operación y la capacidad de uso de la máquinas de teñido; y establecer el mejoramiento del proceso mediante el aprovechamiento de la capacidad máxima de funcionamiento de las calderas y a su vez de las máquinas de teñido para lograr una mayor eficiencia y usar la capacidad máxima de carga de tela en las máquinas de teñido para aprovechar al máximo el consumo de calor y de electricidad.[7]

Finalmente, el análisis de integración térmica de los procesos, se establecen dos propuestas de mejora:

En el proceso de generación en la caldera, se plantea la recuperación térmica de los residuos del proceso de teñidos, en las dos corrientes con mayor potencial energético. Los humos de chimenea le transfieren calor, al retorno de condensados a la caldera; se determinó que es posible obtener un ahorro energético y un ahorro económico del 3,43%, que también corresponde al aumento en la eficiencia. La eficiencia de la caldera, aumenta con la elevación de la temperatura del agua de alimentación, pues esto hace que se necesite menos energía desde el gas natural para producir la misma cantidad de vapor o con la misma cantidad de combustible generar más vapor, que puede ser aprovechado en el proceso de teñido.

La integración de corrientes en las máquinas de teñido, se aprovecharía la corriente de salida de vertimientos calientes, para calentar el agua de proceso fresca que se requiere a una temperatura específica durante el proceso, con el fin de reducir el consumo de vapor; esto se puede llevar a cabo encaquetando la máquina de teñido e instalado una línea de recuperación de vertimientos y se determinó un ahorro en calor de aproximadamente 20%.

CONCLUSIONES

Se concluye que, los tipos de energía que se utilizan en el proceso principalmente son la eléctrica y la térmica, donde esta última en la planta es muy superior con respecto a la energía eléctrica (83% /16%), sin embargo en la maquina la proporción disminuye a un 64% /36%, esto nos demuestra que existen pérdidas importantes de energía térmica entre el generador (caldera) y el consumidor (máquina) donde se confirma que el área de teñido es el de mayor consumo térmico, por lo tanto también se define que el turno de la mañana es el de mayor consumo energético y el turno de la noche es el que presenta mayor ineficiencia. Debido a los tiempos muertos, se presentan unas pérdidas significativas en las energías estudiadas, es decir, el indicador de mayor ineficiencia resultó ser el de tiempos de operación. Finalmente el análisis de integración más influyente fue el de las calderas ya que demostró un aumento de la eficiencia; por ello se recomienda a la industria textil, reducir costos e impacto ambiental a través del aprovechamiento de gases y líquidos residuales del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Determinación del potencial técnico y económico de URE en el subsector industrial de textiles. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Bogotá D.C, 2002, pp 14-15.
- [2] M. Bermúdez, "Determinación del potencial técnico y económico de URE en el subsector industrial de textiles". Bogotá D.C: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO-ENERGÉTICA, 2002.
- [3] B. Alvarez (2003) "Evaluación de Desempeño Ambiental, ISO 1403". [Online]. Available: <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/MERCOSUR/File/06-GTZ%20-%20EDA.pdf>
- [4] F. Cardona (2011) APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 50001. Obtenido de APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 50001. [Online]. Available: <http://www.min->

minas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Grupo%20de%20Participacion%20Ciudadana/AplicacionDeLaNormalISO50001.pdf

[5] Manual de eficiencia energetica para Pymes industria textil. Centro de eficiencia energetica del gas natural Fenosa, España, 2004, pp 10-12.

[6] M. Gonzalez, "Costos de produccion," in *Introduccion a la ingenieria de procesos*, Gonzalez M, Mexico: Limusa, 2013, pp 256-276.

[7] M. Lozano, in *Integracion termica de procesos*, Zaragoza, España; Universidad de Zaragoza, 2007.

[8] J. Rodriguez, "Elaboracion de proyectos de guias de orientacion del uso eficiente de la energia y de diagnostico energetico", Ministerio de energia y minas, Peru, 2008.

[9] P. Anastas and J. Zimmerman, in *Through the 12 principles green engineering*, American Chemical Society, USA, 2003, pp 94A-101A.

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA PLANTA TERMoeLECTRICA PILOTO CON SOBRECALENTAMIENTO DE VAPOR

Gómez Sandoval, Daniel Leonardo¹
Silva Leal, Vladimir²
Mendoza Geney, Libardo³

¹ Universidad ECCI, Bogotá, Colombia, Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía GIATME
² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia
³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia
dlgomezs611@gmail.com

ÁREA TEMÁTICA

Eficiencia y auditoría energética, Energías Alternativas: Energía termoeléctrica.

RESUMEN

En el presente estudio se muestra el análisis exergético realizado a una planta piloto de vapor para la generación de energía eléctrica ubicada en la Universidad ECCI Bogotá-Colombia. Se inicia con un balance energético a la planta para determinar los estados termodinámicos a la entrada y salida de cada uno de los equipos de interés, además, se da a conocer la eficiencia total de la planta en cada una de las condiciones de carga y el costo de producción de vapor para generación de energía eléctrica. Aplicando el método del balance exergético, se determinan las principales fuentes de irreversibilidades e ineficiencias de la planta. El análisis muestra que la caldera es la mayor fuente de irreversibilidades cercana al 77% del total y la bomba la menor con un 0,02%. La eficiencia total de la planta es del 0,7% mientras que la eficiencia exergética es cercana al 3%.

Palabras clave: *Eficiencia, Energía, Exergía, Irreversibilidades*

INTRODUCCIÓN

El término exergía nace a mediados de los ochenta por medio de Kotas [1], quien hace referencia a la disponibilidad de energía que se puede convertir en trabajo dentro de un sistema. Él muestra en sus análisis que la exergía puede cambiar dependiendo de las condiciones en las que se operan las plantas de potencia y también de las condiciones en las que se encuentra el entorno que la rodea. Cabe resaltar el tema de la exergía de un combustible, manifestando que para los combustibles gaseosos, el cálculo de la exergía se lleva a cabo mediante la mezcla de varios gases ideales, mientras que para combustibles líquidos y sólidos, el cálculo de la exergía es el mayor inconveniente, ya que presentan una composición química regular. De esta manera, el autor asume que la exergía de un flujo químico (combustión) es la magnitud de su poder calorífico inferior (LHV).

Lugo, Salazar, Zamora, Torres y Toledo [2] obtienen modelos exergéticos de una central termoeléctrica real, ubicada en Ciudad Lerdo - México, destacando el generador de vapor (caldera) como la mayor fuente de irreversibilidades y a las bombas hidráulicas como la fuente de menos pérdidas. Esta planta obtiene una eficiencia exergética del 37% debido a que alcanza una potencia de 160 MW, y su eficiencia es comparable a las obtenidas por plantas térmicas similares.

Ege y Mehmet [3] obtienen eficiencias energéticas cercanas al 2% y eficiencias exergéticas cercanas al 1%, las cuales dependen de las diferentes cargas de potencia eléctrica generada (100%, 80%, 60%...) con el fin de obtener resultados comparativos en cada condición de operación y encontrar la carga óptima para el funcionamiento de la planta térmica. Rosell [4] muestra la distribución de la energía en cada uno de los componentes de la central eléctrica con múltiples expansiones y tren de calentadores, esta metodología ayuda a mostrar con mayor facilidad la localización de las fuentes de exergía destruida y las eficiencias exergéticas de los equipos, además, destaca la importancia de los diagramas de Sankey para verificar la disponibilidad de la energía suministrada.

Gonzalez y Cantillo [5] han obtenido una eficiencia total del 1,5% para una planta con sobrecalentador y economizador incorporado en la chimenea de la caldera, esto con el fin de sobrecalentar el vapor a la salida de la caldera y precalentar el agua de alimentación a la salida de la bomba, además, el empleo del economizador ayuda a disminuir la temperatura a la salida de los gases, aprovechando en gran parte la energía por

medio de un intercambio de calor. Con estas modificaciones en la planta, aun así no han obtenido el mejor resultado, ya que la planta fue instalada con fines didácticos y genera 2,8 kW de energía a una presión óptima de 80 psi.

Fusté [6] muestra varios enfoques de los ciclos Rankine y sus modificaciones, con el fin de conocer los parámetros que afectan el rendimiento de las centrales térmicas convencionales de alta potencia. Han trabajado con centrales reales con regeneración y recalentamiento, mostrando un ahorro económico en la operación de la planta, trabajando únicamente con el análisis de primera ley. El ciclo Rankine con sobrecalentamiento es base para los análisis energéticos a varias condiciones de carga.

Cengel, Boles [7], Moran y Shapiro [8] han manifestado la importancia de la primera ley y la segunda ley de la termodinámica, la primera, en relación a la conservación de la energía durante un proceso en un sistema térmico, mientras que la segunda, habla sobre la calidad de la energía o degradación de la misma. Por medio de estas bases, aplican el análisis exergético para encontrar la ubicación y magnitud de las pérdidas energéticas asociadas a los equipos y así crear un sustento para optimizar o rediseñar sistemas termodinámicos complejos.

Los objetivos de este estudio son centrados en el análisis energético a varias condiciones de carga, es decir, conocer la eficiencia total de la planta y su costo de producción de vapor conforme se aumenta la generación de energía eléctrica en un banco de bombillos, a partir de este análisis, se conoce la carga óptima de funcionamiento de la planta y, posteriormente, se hace un análisis de exergía para conocer las irreversibilidades involucradas en cada uno de los equipos junto a las eficiencias exergéticas (pérdida de potencial) en su operación. El alcance de este estudio es netamente teórico, ya que se plantean unas observaciones que pueden ayudar a mejorar las condiciones de operación de los equipos involucrados sin llegar a realizar modificaciones a la planta piloto.

Nomenclatura

- E Energía
- $\dot{Q}$ Flujo de calor (kW)
- P Potencia (kW)
- I Corriente (Amp)
- V Voltaje (Volt)

- η Eficiencia (%)
- $\dot{V}$ Caudal o flujo volumétrico (gal/h)
- C Costos de ACPM (COP/gal)
- κ Costo de producción (COP/kWh)
- $\dot{m}$ Flujo másico (kg/s)
- h Entalpía específica (kJ/kg)
- T Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- s Entropía específica (kJ/kg.K)
- A Exergía (kW)
- α Exergía específica (kJ/kg)
- ε Eficiencia exergética (%)

Subíndices

- c Cinética
- p Potencial
- i Flujo especificado
- G Generación
- 0 Estado de referencia
- m Medio de propagación
- D Destruída

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

En la figura 1, se evidencia el diagrama de la planta térmica con la respectiva identificación de equipos y botones (círculos azules) que permiten identificar las variables de temperatura, por medio de termocuplas, y presión manométrica a través de manómetros análogos.

Figura 1. Diagrama de la planta térmica piloto de la Universidad ECCI

En la figura 2 se puede observar el banco de cargas (bombillos) donde se ejecuta el trabajo de la turbina, reflejado en la potencia eléctrica que entrega el conjunto turbina-generador. La turbina puede generar hasta 2 kW de potencia, pero se trabaja con un banco de 10 bombillos que consumen 1,8 kW de potencia.

Figura 2. Banco de cargas eléctricas para generación de energía

En la figura 3 se muestra el diagrama con los equipos involucrados de la planta térmica piloto de la Universidad ECCI. A la salida de la caldera se obtiene la mayor fuente de energía del ciclo y a la salida del tanque de condensados, la menor fuente de energía. El condensador trabaja como un intercambiador de calor cerrado con agua como refrigerante.

Figura 3. Diagrama de equipos de la planta térmica piloto. Cortesía de CyclePad

Métodos

Para llevar a cabo los análisis energéticos y exergéticos se tienen en cuenta las siguientes idealizaciones:

Los cambios en la energía cinética y potencial son insignificantes en comparación de la energía térmica, es por este concepto que se excluyen de los cálculos. ($E_c, E_p = 0$)

La turbina y la bomba se consideran como equipos adiabáticos ($\dot{Q}_i = 0$)

El flujo másico a través de la planta térmica como volumen de control se considera permanente a menos que las condiciones de carga varíen, es por este concepto que las propiedades en cualquier punto de medición no varían con el tiempo. ($\dot{m}_i = Cte$)

Análisis energético a varias condiciones de carga

Por medio de los botones azules anteriormente estipulados, se miden las siguientes variables a diferentes condiciones de carga:

Presión a la salida de la caldera (**120 psig**), presión a la entrada y salida de la válvula PID, ya que la planta trabaja con un Controlador Lógico Programable (**PLC por sus siglas en inglés**), presión a la entrada y salida de la turbina, presión a la salida del condensador y presión a la salida y entrada de la torre de enfriamiento. Las presiones manométricas las mide el PLC en Bar.

Temperatura a la salida de la caldera, temperatura a la entrada y salida de la turbina, temperatura a la entrada y salida del tanque de condensados y temperaturas a la salida y entrada de la torre de enfriamiento. Las temperaturas están en °C.

Caudal de vapor (kg/h) y Caudal de agua de refrigeración (l/s).

Corriente y voltaje en las tres fases del sobrecalentador junto con la corriente y voltaje que genera el conjunto turbina-generador.

Se calcula la potencia eléctrica generada a varias condiciones de carga por medio de la ecuación 1.

$$P_G = I_G V_G \quad (1)$$

Como ya se sabe, el objetivo de un análisis energético a un sistema térmico, es encontrar la eficiencia del ciclo, la cual nos dice cuanto estamos generando de lo que estamos consumiendo, pero en el análisis se va mas allá, y es que lo que se genera no es solo el calor ofrecido en la combustión, el calor ofrecido por las resistencias eléctricas también es vital para el cálculo de la eficiencia térmica, que depende del calor aprove-

chado por la caldera y el sobrecalentador, además del calor suministrado por la combustión y el sobrecalentador. Con los datos de eficiencia del ciclo y eficiencia térmica, se da a conocer la eficiencia total de la planta térmica, la cual es indispensable para determinar la carga óptima de operación de la planta. En la ecuación 2 se describe la eficiencia del ciclo, en la ecuación 3 la eficiencia térmica y en la ecuación 4 la eficiencia total.

$$\eta_{ciclo} = \frac{P_{neta}}{Q_{combustión}} \quad (2)$$

$$\eta_{termica} = \frac{Q_{caldera} + Q_{sobrecalentador}}{Q_{combustión} + Q_{eléctrico}} \quad (3)$$

$$\eta_{Total} = \eta_{ciclo} \cdot \eta_{termica} \quad (4)$$

Para determinar el costo del kWh generado, se emplea la ecuación 5 mostrada a continuación:

$$Costo_{producción} = \frac{\dot{V}_{ACPM} \cdot C}{\dot{W}_G} \quad (5)$$

Exergía en flujos determinados

Exergía para flujos estables

Para calcular las propiedades del estado de referencia, se toman las variables de temperatura y presión en Bogotá, las cuales son 18°C y 75 kPa.

Se tiene entonces que la Exergía específica (α) para un flujo másico estable será:

$$\alpha_i = (h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0) \quad (6)$$

Exergía para flujos de calor

$$A_i = Q_i \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \quad (7)$$

Trabajo útil máximo (exergía)

Para realizar un balance exergético a cada uno de los equipos involucrados en la planta termoeléctrica, es necesario conocer los distintos flujos que intervienen en su proceso. En la figura 4 se muestran los flujos de la planta térmica piloto.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis energético a varias condiciones de carga

En la figura 5 se muestra la eficiencia total de la planta a varias condiciones de carga.

Figura 5. Eficiencia total de la Planta piloto a varias condiciones de carga

Según las figuras 5 y 6, la carga 8 (80% de potencial eléctrico) es la condición óptima de operación de la planta, ya que se obtiene la mayor eficiencia total y el menor costo de producción de vapor para generación de energía eléctrica. Se procede a obtener las propiedades termodinámicas de la Planta al 80% de potencial, es decir, las variables de entrada y salida en cada uno de los equipos. La tabla 1 muestra estos resultados con el fin de finalizar el análisis energético de la planta piloto.

Figura 6. Costo de producción (COP/kWh) a varias condiciones de carga

Figura 4. Flujos involucrados en la planta térmica

La exergía para flujos de agua y vapor se calcula por medio de la ecuación 6, la exergía para flujos de calor con la ecuación 7. Cabe resaltar en esta imagen la dirección de las flechas, si señala a un equipo, indica que se suministra calor o potencia al sistema, si la flecha sale de un equipo muestra que se rechaza calor o se genera potencia. La flecha 14 se ubica en esa posición debido a que allí es donde el calor rechazado por el condensador se rechaza al ambiente por medio de la torre de enfriamiento.

Balance exergético

El balance de exergía permite descifrar la exergía consumida (Dispositivos consumidores de trabajo), la exergía generada (Dispositivos generadores de trabajo) y la exergía destruida en cada uno de los procesos involucrados. A modo de ejemplo se muestra el balance exergético aplicado a la turbina por medio de la ecuación 8.

$$\begin{aligned}
 A_{\text{entrada}} &= A_{\text{salida}} \\
 A_4 &= A_5 + A_{13} + A_D \\
 A_D &= (A_4 - A_5) - A_{13} = P_{\text{reversible}} - P_{\text{útil}}
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

La eficiencia por la segunda ley de la termodinámica (calidad de la energía) se calcula por la ecuación 9 mostrada a continuación:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{producto}}}{A_{\text{recurso}}} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{reversible}}} = \frac{A_{13}}{A_4 - A_5} \quad (9)$$

La potencia útil o A13 es la potencia o exergía que se genera en la turbina. La potencia reversible Prev es la diferencia de exergías a la entrada y salida de la turbina. La potencia útil para equipos generadores de trabajo viene siendo la exergía del producto, ya que siempre se obtendrá menos trabajo del que se puede aprovechar. Para equipos consumidores de trabajo, como en el caso de la bomba, los cálculos tornan al contrario.

Tabla 1. Propiedades termodinámicas a 80% de potencial de la planta piloto.

No	P absoluta (kPa)	T (°C)	v (m3/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	Calidad %	Fase
1	901,8	175,5	0,2146	2774	6,622	100%	saturated
2	734,7	170,4	0,2632	2774	6,71	-	superheated
3	664,7	168,2	0,2909	2774	6,754	-	superheated
4	617,7	162	0,3089	2763	6,761	-	superheated
5	86,76	97	1,942	2672	7,414	-	superheated
6	89,63	96,6	0,7513	1311	3,719	39,99%	saturated
7	74,66	63,2	0,001019	264,6	0,8711	-	liquid
8	1453	63,41	0,001018	266,6	0,8729	-	liquid
9	202	24,6	0,001003	103,3	0,3613	-	liquid
10	154,9	40,9	0,001008	171,4	0,5842	-	liquid

La figura 7 muestra el diagrama de temperatura respecto a la entropía de las propiedades termodinámicas confinadas en la octava carga (80%) de la planta térmica piloto. Este diagrama es importante para observar el comportamiento de los procesos involucrados de la planta térmica.

Figura 7. Diagrama de Temperatura Vs Entropía en cada uno de los estados termodinámicos en la Octava carga de la Planta térmica piloto.

La figura 8 muestra la degradación de la energía en cuanto al balance energético de la planta para los flujos del ciclo Rankine con sobrecalentamiento, sin incluir la torre de enfriamiento, pero también muestra la pérdida de potencial máximo conforme ingresa a cada equipo (procesos termodinámicos), obteniendo el mayor potencial a la salida de la caldera, y el menor en el tanque de condensados.

Figura 8. Degradación de la energía y exergía de los flujos 1-8 en la Planta piloto.

Análisis exergético a condición óptima

A partir de los flujos de exergía (kW) en cada uno de los flujos especificados de la planta, se realiza el balance exergético en cada equipo involucrado como un pequeño volumen de control con flujo permanente. La tabla 2 muestra el resultado de las irreversibilidades totales de la planta y las eficiencias exergéticas de cada equipo

Tabla 2. Exergía destruida y eficiencias exergéticas en los equipos de la Planta piloto.

Equipo	Exergía destruida (kW)	Eficiencia Exergética
Bomba	0,02343	73,6%
Caldera	106,019	25,8%
Distribuidor	1,1319	0,0%
Válvula PID	0,5659	0,0%
Sobrecalentador	5,4712	0,0%
Turbina	11,344	8,7%
Condensador	12,630	0,0%
Tanque condensados	1,5099	0,0%
Exergía destruida TOTAL	138,6960 kW	

En cuanto a las eficiencias exergéticas, explican que los equipos no tienen el potencial para convertir en trabajo toda la exergía que entra a los volúmenes de control, por lo tanto, hay una cantidad de exergía que se pierde al ambiente en forma de calor. En el caso del condensador y el tanque de condensados, no se aprovecha la exergía del calor rechazado, por lo tanto su eficiencia exergética es del 0%, en el caso del sobrecalentador, se rechaza calor en vez de aprovecharlo para sobrecalentar el vapor, por tanto su eficiencia es del 0% también. La figura 8 muestra el porcentaje de irreversibilidades en cada uno de los equipos y accesorios, en comparación con la irreversibilidad TOTAL de la planta térmica piloto de la Universidad ECCI.

CONCLUSIONES

La eficiencia del ciclo ronda el 0.7%, esto se debe a que la energía consumida en la combustión y por las resistencias eléctricas, no es totalmente aprovechada para generar trabajo por parte de la turbina. Cabe considerar que la planta fue construida para fines didácticos y no se consideró invertir en una turbina con mayor capacidad para generar trabajo y en un sobrecalentador que no consumiera energía eléctrica. El valor de la potencia generada por la turbina obedece a la máxima carga (10 bombillos encendidos 1800 W). Aquí se puede observar que existen irreversibilidades internas en el conjunto turbina-generator, ya que al encender las 10 cargas, está generando una potencia de 1077 W, que equivale al 60% de la carga total a 1800 W, y esta carga equivale al 90% de la carga máxima (2000 W). Pese a estos inconvenientes, la carga 8 presenta la mejor eficiencia total y el menor costo de producción de vapor para generación de energía eléctrica con un valor de \$25400 COP por kWh generado. Se muestra que la turbina (8%), condensador (9%) y tanque de condensados (1%), son fuentes significantes de degradación de la energía. En cuanto al condensador y al tanque de condensados, en ellos se rechaza calor al ambiente, por lo tanto el potencial máximo de este calor es desaprovechado totalmente. La turbina representa la menor eficiencia exergética cercana al **9%**. La caldera es la mayor fuente de exergía destruida con el 76% de las irreversibilidades totales y esto se debe a que la exergía generada por la combustión es aprovechada en un 26% para generar vapor. La fuente de menor irreversibilidad es la bomba con un 0,02% y la de mayor eficiencia exergética cercana al 74%, ya que en dispositivos que consumen trabajo, se aprovecha más el potencial del recurso para entregar potencial al fluido de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al Ph.D. José Manuel Riesco Ávila, por su asesoría durante la estancia del 4° Verano de la Investigación Científica para Estudiantes de Excelencia inscritos en una institución de educación superior del país o del extranjero, realizado en la Universidad de Guanajuato, Gto., México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Londres: Butterworth, 1985.

Figura 8. Porcentaje de irreversibilidades en comparación a la total (exergía destruida), en cada uno de los equipos involucrados de la planta térmica

La figura 9 muestra el diagrama de Sankey de la planta, evaluado con el poder calorífico inferior de la combustión y el porcentaje de pérdidas por irreversibilidades en cada uno de los equipos, al final del diagrama, se obtiene la eficiencia exergética de la planta. Al referirse a la planta como un sistema generador de trabajo (energía eléctrica), es viable que se genere menos del potencial máximo que se puede generar a determinadas condiciones de operación y ambientes de referencia.

El diagrama explica el total de la exergía que se tiene, las pérdidas de exergía que ocurren en cada uno de los procesos y su magnitud en porcentaje comparándola con la entrada, es decir, que el 74% de la exergía proveniente de la combustión se pierde en la caldera, que es lo mismo a decir que el 26% se aprovecha para generar vapor en el ciclo, después, el 0,8% de este 26% de potencial, se pierde en el distribuidor debido a irreversibilidades internas y así posteriormente hasta llegar a la eficiencia exergética de la planta térmica piloto.

Figura 9. Diagrama de Sankey con respecto al porcentaje de irreversibilidades de la planta.

[2] M. S. J. Z. A. T. M. T. R. Lugo, "Análisis exergético de una central termoeléctrica," *Científica*, vol. 13, nº 1, pp. 17-25, 2009.

[3] H. M. A. Ege, "Determination of uncertainties in energy and exergy analysis of a power plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 85, nº 1, pp. 399-406, 2014.

[4] M. Rosell, "Análisis exergético de una central termoeléctrica de ciclo de vapor," Tesis de pregrado, Dep. Física y Matemáticas, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México, 2005.

[5] P. C. L. Gonzalez, "Análisis exergético de la planta térmica de la escuela de ingeniería mecánica," Tesis de

pregado, Dep. Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2009.

[6] S. Fusté, "Análisis termodinámico de los ciclos de Rankine," Tesis de pregrado, Dep. Ciencia e Ingeniería Náutica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Catalunya, España, 2015.

[7] M. B. Y. Çengel, *Thermodynamics. An Engineering Approach*, New York: (7th Ed.) The McGraw-Hill, 2011.

[8] H. S. M. Moran, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Hoboken: (4th Ed.) Wiley, 1999.