

Modelo de gestión del residuo de cascarilla mediante cogeneración en pymes arroceras, un estudio de caso¹

Carlos A. Nuncira Negrete²

Resumen

En Colombia la molienda de arroz se desarrolla en muchos casos sin tener en cuenta consideraciones de sostenibilidad, debido principalmente a la inadecuada gestión de sus residuos lo que genera impactos ambientales negativos que deben ser considerados. El objetivo de este estudio es el diseño de un modelo de gestión sostenible del residuo de la cascarilla en pymes arroceras a través de un estudio de caso. Se propone el aprovechamiento energético mediante cogeneración partiendo de la caracterización del proceso. Se seleccionó la tecnología de generación mediante turbina

de vapor con base en criterios técnicos, ambientales y financieros. Una vez se realizó el diseño preliminar, los análisis financieros mostraron que la mejor opción resulta cuando se incorporan los incentivos tributarios estatales. La cogeneración se constituye como una opción válida para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales de los molinos arroceros, aun en empresas con pequeña escala ya que suple una necesidad interna energética y de calor, mejora la competitividad y el desempeño ambiental de los molinos arroceros

Palabras clave: gestión ambiental, sostenibilidad, cogeneración, cascarilla de arroz.

- 1 Artículo original derivado del proyecto de investigación *Desarrollo de tecnologías en el área de energías alternativas de la Fundación Universitaria del Área Andina en Valledupar, Colombia*; ejecutado entre febrero de 2021 y enero de 2022 por el grupo de investigación GIMA (<https://cutt.ly/ttrvOPxK>) de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, proyecto financiado con recursos propios.
- 2 Magíster en Gestión Ambiental de la Fundación Universitaria del Área Andina, Valledupar, especialista en Gerencia Ambiental de la Corporación Universitaria CECAR, Sincelejo, ingeniero químico de la Universidad del Atlántico, Barranquilla. Docente de ciencias naturales y educación ambiental, Secretaría de Educación del departamento de Córdoba, Colombia. Correo: cnuncira@estudiantes.areandina.edu.co / Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6099-9720>.

Autor para Correspondencia: Correo: cnuncira@estudiantes.areandina.edu.co
Recibido: 09/02/2022 Aceptado: 13/06/2023

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

Husk Waste Management Model Through Cogeneration in Rice Pymes, a Case Study

Abstract

In Colombia, rice milling takes place in many cases, without taking into account sustainability considerations, mainly due to the inadequate management of its waste which generates negative environmental impacts that must be considered. The objective of this study is the design of a model of sustainable management of husk waste in rice SMEs through a case study, the energy use is proposed through cogeneration

based on the characterization of the process. Steam turbine generation technology was selected based on technical, environmental, and financial criteria. Once the preliminary design was made, financial analyses showed that the best option is when state tax incentives are incorporated. Cogeneration is a valid option for the use of agroindustrial waste from rice mills, even in small-scale companies since it meets an internal energy and heat need, improves the competitiveness and environmental performance of rice mills.

Keywords: Environmental Management, Sustainability, Cogeneration, Rice Husk.

Modelo de gestão de resíduos de casca por cogeração em pymes de arroz, estudo de caso

Resumo

Na Colômbia, a moagem de arroz ocorre em muitos casos, sem levar em conta considerações de sustentabilidade, principalmente devido à gestão inadequada de seus resíduos que gera impactos ambientais negativos que devem ser considerados. O objetivo deste estudo é a concepção de um modelo de manejo sustentável dos resíduos de casca em PMs de arroz por meio de estudo de caso, o uso de energia é proposto por meio de cogeração

a partir da caracterização do processo. A tecnologia de geração de turbinas a vapor foi selecionada com base em critérios técnicos, ambientais e financeiros. Uma vez feito o projeto preliminar, análises financeiras mostraram que a melhor opção é quando os incentivos fiscais estaduais são incorporados. A cogeração é uma opção válida para o uso de resíduos agroindustriais de fábricas de arroz, mesma em pequenas empresas, uma vez que atende a uma necessidade interna de energia e calor, melhora a competitividade e o desempenho ambiental das usinas de arroz.

Palavras-Chave: gestão ambiental, sustentabilidade, cogeração, casca de arroz

Introducción

El uso excesivo de combustibles fósiles ha dado origen a una crisis energética y ambiental. Una de las propuestas planteadas por la comunidad científica para dar solución a esta problemática es la transición a nuevas fuentes de energía renovables, como la biomasa, la luz solar, las mareas y las fuentes geotérmicas. Sin embargo, en las últimas décadas la biomasa es una de las fuentes de energía renovable más ampliamente usada como combustible para generación en centrales eléctricas. Es así como Cerdá (2012) distingue dentro de la biomasa cuatro fuentes energéticas: la biomasa sólida, el biogás, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORsU) y los biocombustibles (también llamados biocombustibles líquidos).

En particular, la utilización de biomasa sólida proveniente de actividades agrícolas ha tenido gran interés, debido a la abundancia de estos residuos. Uno de los tipos de biomasa con mayor potencial es la lignocelulósica, que incluye entre otros los residuos agrícolas de arroz, particularmente la cascarilla que es el principal desecho de esta agroindustria. De acuerdo con la International Energy Agency (2019), la abundancia de este residuo a nivel mundial para el año 2018 estaba en el orden de los 170 millones de toneladas, lo que representa un potencial energético aproximado de 2,6 terajulios (TJ) los cuales pudieron haber suplido aproximadamente el 30 % de los 82 TJ de consumo de energía eléctrica a nivel mundial de ese mismo año, de modo que su potencial aprovechamiento plantea la posibilidad de la disminución

de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la sustitución de combustibles fósiles, ofrece además la ventaja de que su uso no representa una amenaza a la seguridad alimentaria.

Ahora bien, la cascarilla de arroz expone una capacidad energética notable para suplir necesidades industriales, toda vez que, según Sims *et al.* (2015), para la generación de 1 kWh de electricidad se requieren de dos a tres kilogramos del residuo (en base seca), sin embargo, se estima que únicamente alrededor del 15 % de este residuo es aprovechado en la generación de calor para el consumo interno en los molinos y más del 50 % del residuo se quema de manera incontrolada (Shafie, 2016) generando problemas ambientales y ocasionando afectaciones a la salud en las comunidades aledañas a estas instalaciones.

Así mismo, el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos en su informe de 2019 estima que la industria de molienda de arroz en Colombia está formada por 91 empresas que cuentan con 101 instalaciones ubicadas en dieciséis departamentos. El nivel de impacto de estas instalaciones depende de varios factores entre los cuales está la capacidad de procesamiento, el nivel tecnológico de sus procesos y el grado de compromiso socioambiental de las compañías. Para comprender la situación de los molinos arroceros en Colombia, se debe tener en cuenta la clasificación realizada por Becerra *et al.* (2018) que se muestra en la **tabla 1**, en ella se toman como criterios de clasificación el margen de producción y el nivel tecnológico de los procesos.

Tabla 1. Tipología de molinos arroceros en Colombia

Tipo	Características
I	Constante innovación en tecnología de producción, con “tecnología de punta”, procesan, en promedio más de 60.000 t/año y algunas sobrepasan las 100.000 t/año
II	La innovación tecnológica la realizan comprando versiones fabricadas en el país de las máquinas importadas por los líderes. Procesan entre 20.000 y 50.000 t/año.
III	Trabajan con tecnología atrasada, aunque de manera continua. Procesan entre 3.000 y 10.000 t/año.
IV	Trabajan de manera esporádica, utilizan tecnología atrasada y procesan cantidades inferiores a 3.000 t/año.

Nota: adaptado de Becerra *et al.* (2018).

Es importante destacar que, del total de las instalaciones de molienda de arroz en Colombia, el mayor porcentaje corresponde a empresas clasificadas como tipo III y IV (79 %), siendo sus principales características el atraso tecnológico, el bajo nivel de eficiencia energética y un pobre desempeño ambiental. En cuanto a

las tecnologías de conversión de biomasa en energía y calor, la literatura muestra que estas se clasifican en dos categorías como lo muestra la **figura 1**, la primera la conforman aquellas que emplean procesos termoquímicos y la segunda las que emplean procesos bioquímicos (Lim *et al.*, 2012).

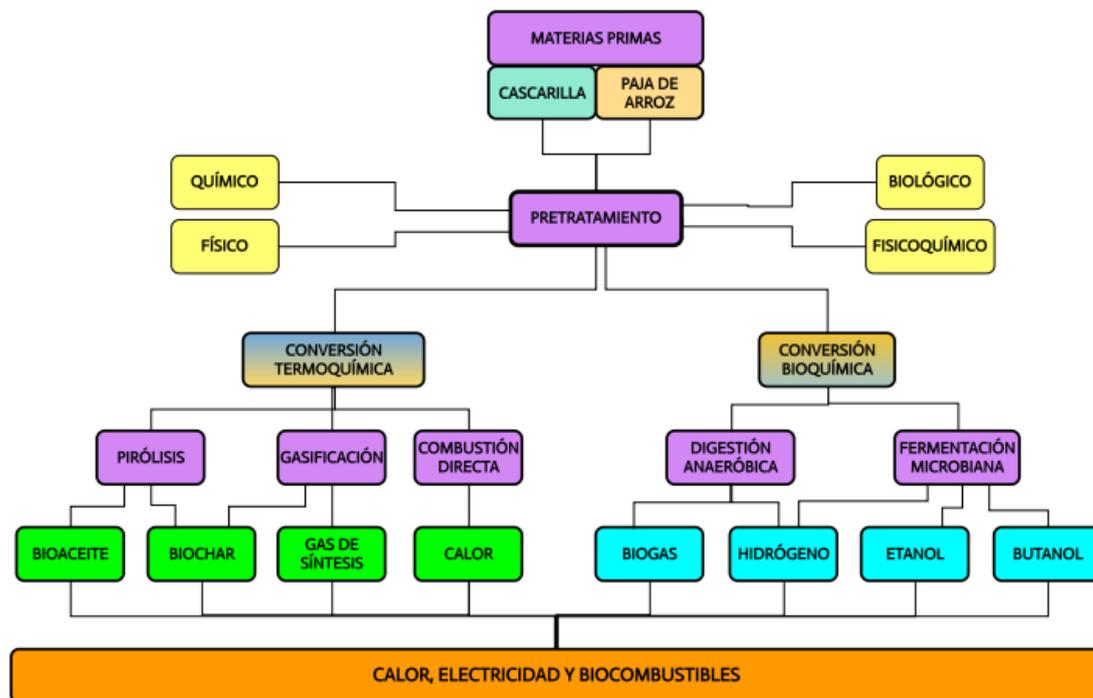


Figura 1. Tecnologías de conversión de residuos de arroz en bioenergía

Nota: elaboración del autor.

Ahora bien, en Colombia, existen solo treinta y tres emprendimientos que usan biomasa como combustible para generar energía (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019), de los cuales solo uno de ellos emplea cascarilla de arroz como combustible, este proyecto se encuentra en fase de prefactibilidad (fase I) y es adelantado por la Industria Arrocera Federal S. A., ubicada en el municipio de Piedras (Tolima), proyecta generar 350 kW lo cual es equiparable con la energía producida por una minicentral hidroeléctrica (entre 5 y 500 kW). La ausencia de proyectos de generación a partir del residuo de la cascarilla muestra que hay un amplio espacio para el desarrollo de investigaciones y proyectos en torno al aprovechamiento energético sostenible de este residuo.

En consecuencia, se establece como objeto de este estudio el diseño un sistema de gestión sostenible de la cascarilla de arroz mediante cogeneración, partiendo de su potencial energético y teniendo en cuenta las condiciones particulares de los molinos arroceros en la costa atlántica de colombiana y de manera particular de la empresa escogida para el estudio de caso.

Materiales y métodos

La investigación estuvo enfocada en el diseño de un modelo de gestión del residuo de cascarilla de arroz producido por molinos arroceros mediante cogeneración, aplicado al estudio de caso de la industria arrocera Palmira ubicada en el municipio de Sahagún, departamento de Córdoba en la región Caribe colombiana, para lo cual se desarrollaron las siguientes fases en la investigación:

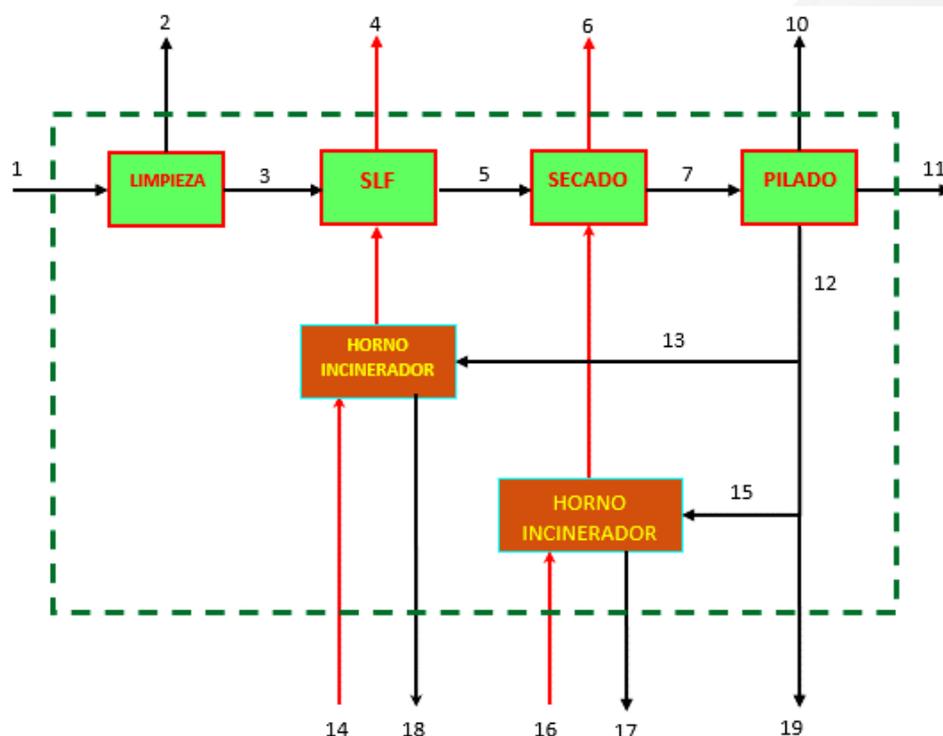
- Revisión de antecedentes: se enfocó en la búsqueda en las bases de datos Scopus y Springer de casos de aprovechamiento de la cascarilla en cogeneración en los contextos mundial, regional y local, así como de las principales tecnologías aplicadas en este contexto.
- Caracterización del caso de estudio: para establecer la condición técnica, económica y ambiental de base de la industria arrocera escogida se recopilaron datos en seis visitas de campo precisando la capacidad de producción, tecnología utilizada, requerimiento energético, costos de energía, condiciones de proceso, cumplimiento de requerimientos y gestión ambientales empresarial. Para la determinación de las características de la cascarilla se tomaron como base los estudios previos realizados por Valverde *et al.* (2007). Dentro de las características referenciadas están su análisis próximo, análisis último o elemental, poder calorífico inferior en función de la humedad y su composición química.
- Realización de balances globales: en esta actividad se definieron los diagramas de bloques y de procesos (PFD), así como los flujos de materia y energía que se presentan entre las distintas operaciones y procesos unitarios que integran el macroproceso de molienda incluyendo los procesos de servicio y complementarios.

- Desarrollo de ingeniería de concepto y de diseño preliminar, de la propuesta de cogeneración a partir de la cascarilla de arroz: se realizó teniendo como base la asesoría de un experto³ para la definición de los aspectos técnicos, partiendo de los balances de materia y energía definidos en la fase anterior, además se consideró en el análisis la escala de generación y la disponibilidad de tecnología en el mercado. En cuanto a los aspectos financieros tenidos en cuenta, estuvieron los costos de inversión, operación y mantenimiento de acuerdo con la tecnología disponible (Rincón y Silva, 2014). A continuación, se procedió a la estructuración del modelo desde el componente técnico a través del diseño preliminar, el componente ambiental por medio de la inclusión de externalidades en los cálculos de costos y el componente financiero el cual se proyectó sobre la base de una evaluación financiera, teniendo como referencia indicadores como la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN).
- Aplicación y análisis del modelo: se realizó a partir de la construcción de un formato en Excel que permitió la identificación y valoración de beneficios y desventajas técnicas, ambientales y financieras, mediante la comparación de la condición inicial de base y la condición final proyectada con el modelo de gestión.
- Conclusiones y recomendaciones: una vez realizada la validación del modelo se formularon las respectivas conclusiones y recomendaciones para su aplicación y ajuste.

Resultados

Como resultado de la caracterización de la empresa escogida para el estudio de caso, se proyectó el diagrama de bloques mostrados en la **figura 2**, en el cual se evidencian los diferentes procesos que se desarrollan en la actividad industrial de molienda de arroz y la descripción de las características de la totalidad de las líneas que conectan los procesos.

³ Ingeniero Albero Nuncira, director de división de PCH, Electrohidráulica S. A. Bogotá, Colombia.



LÍNEA	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS	LÍNEA	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
1	Alimentación(AEC*)	14% humedad-5% impurezas	11	Arroz Blanco	Producto listo para empaclado
2	Desechos de limpieza	Sólidos (70% de impurezas)	12	Cascarilla	20% de la corriente 11
3	AEC húmedo	24% de humedad y 30% de impurezas	13	Cascarilla	Flujo Másico de 160 Kg/hr
4	Aire húmedo	Aire con TBS de 40°C y HR=80%	14	Aire fresco	TBS=30oC y HR=30%
5	AEC presecado	Humedad del 16%	15	cascarilla	Flujo Másico de 160 Kg/hr
6	Aire caliente	TBS=80°C y HR=5%	16	Aire fresco	TBS=30oC y HR=30%
7	AEC baja humedad	Humedad del 12%	17	Cenizas	Aprox. 17,8% de la cascarilla
8	Aire húmedo	TBS=39°C y HR=50%	18	Cenizas	Aprox. 17,8% de la cascarilla
9	Aire caliente	TBS=55°C y HR=10%	19	Cascarilla Sobrante	80% de la línea 12
10	Subproductos	Corresponden al 3% de la corriente 7			

* Arroz en concha (AEC) húmedo y con alto contenido de impurezas sólidas de diversos tamaños

Figura 2. Diagrama de bloques de la industria arrocera Palmira SAS⁴

Nota: elaboración del autor.

En la actualidad la empresa procesa un promedio de 17.000 t/año de arroz, esto genera una cantidad aproximada de 3.400 t/año de cascarilla. Para generar aire caliente en el proceso de secado del arroz se quema

aproximadamente el 15 % del residuo en hornos incineradores ineficientes que generan problemas de emisiones debido a que no cuentan con chimeneas adecuadas y porque no dan una correcta disposición

4 Los demás detalles correspondientes a los balances de materia del proceso se pueden encontrar en el anexo técnico.

a las cenizas, además, aproximadamente el 20 % del residuo se vende y el resto se descompone al aire libre o se quema de manera descontrolada en lotes aledaños a las instalaciones de molienda generando material particulado (PM), monóxido de carbono, metano, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), dibenzo-p-dioxinas policloradas, dibenzofuranos policlorados (PCDD/F), carbono elemental (CE) y carbono orgánico (OC).

De igual modo, se escogió la tecnología de cogeneración mediante turbina de vapor teniendo en cuenta entre otros aspectos las condiciones de proceso (especialmente en las corrientes de aire caliente para secado), la disponibilidad de tecnologías y su costo, la magnitud del residuo y la escala de generación. En la **figura 3** se muestra el diagrama de flujo para la instalación de cogeneración, esta se proyectó con una capacidad de 500 kW.

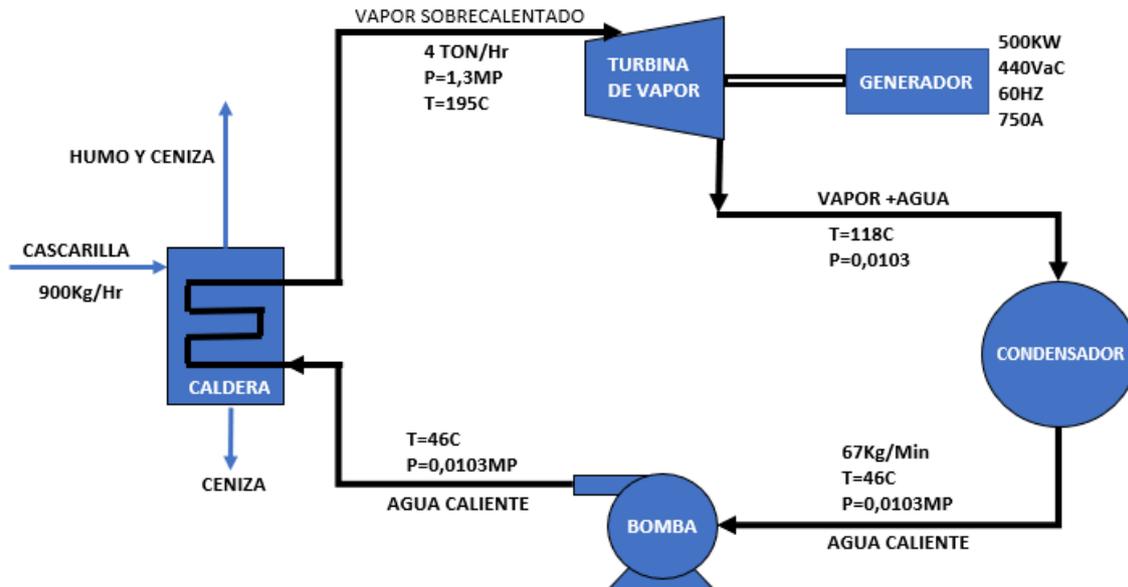


Figura 3. Diagrama de flujo para planta de cogeneración de 500 kW

Nota: elaboración del autor.

Por otra parte, se propuso como esquema de negocio el establecimiento de un contrato de compra de energía a largo plazo (Power Purchase Agreement o PPA) bajo la modalidad de suministro *pague lo generado* a un valor acordado, con una empresa responsable por el diseño, el suministro de equipos, la financiación, la

construcción, el suministro de energía, la operación y mantenimiento del sistema.

Para encontrar el valor inicial a invertir se empleó el método de costos totales empleado por Bueno *et al.* (2016) que incluye las externalidades y se procedió al análisis financiero que se proyectó a partir de dos escenarios, el primero sin los

incentivos tributarios establecidos en la Ley 1715 de 2014 y el segundo incorporando en el análisis financiero estos incentivos. Las demás consideraciones para el análisis financiero se encuentran definidas en

formato Excel del modelo. En la **tabla 2** se muestran los parámetros obtenidos en el análisis financiero VPN y TIR para cada escenario planteado.

Tabla 2. Resumen de flujo de caja y parámetros por escenario

	Alternativa 1	Alternativa 2
Valor presente de suma de flujos actualizados	COP 528.815.127	COP 736.151.252
Valor presente neto	COP -1.689.768.662	-\$ 1.193.769.775
Tasa interna de retorno	17%	33%
Índice de rentabilidad	0,27	0,46

Nota. elaboración del autor.

Como se puede evidenciar, los valores encontrados en los indicadores financieros son positivos y presentan opciones viables, sin embargo, la alternativa 2 nos muestra unas mejores condiciones, esto debido a que en su cálculo se incluyeron los incentivos establecidos por el Estado colombiano para este tipo de proyectos de energía renovable mediante la Ley 1715 de 2014, estos estímulos impactan de manera favorable llevando los indicadores TIR e índice de rentabilidad casi al doble y mejorando el valor presente del proyecto en un 28 %.

Discusión

Con respecto al modelo planteado se puede decir que es posible determinar, a partir de su aplicación y partiendo del diseño preliminar, las condiciones mínimas necesarias para la toma de decisiones de un proyecto de cogeneración a partir de cascarilla, teniendo como base las condiciones específicas de pequeñas industrias, lo cual permite afirmar

que los procesos de cogeneración con biomasa residual proveniente de procesos agroindustriales son una opción válida para el aprovechamiento de dichos residuos ya que además de darle valor al mismo suplen una necesidad interna de aire caliente para secado de la materia prima, además, genera una buena parte del requerimiento energético interno, adiciona nuevas fuentes de empleo y mejoran significativamente la competitividad de las industrias de molinería de arroz, sobre todo en el caso de aquellas que tienen pequeña escala, atraso tecnológico y dificultades financieras para invertir en mejoras internas.

Ahora bien, cabe anotar que, aunque las externalidades generadas en el proceso de cogeneración se tuvieron en cuenta en la determinación del valor inicial a invertir, se hace necesario para posteriores desarrollos incluir estas en el cálculo de los flujos de caja para la realización de los análisis financieros correspondientes, para ello existen en la

actualidad algunas metodologías probadas para su cálculo, como la desarrollada por Carbon Trust (2019).

Conviene subrayar que los proyectos de generación a partir de biomasa se encuentran enmarcados dentro de los proyectos MDL (mecanismo de desarrollo limpio) lo que les permite recibir créditos certificados de reducción de emisiones (CER) que pueden ser convertidos en recursos monetarios que pueden mejorar los resultados del análisis financiero, en este orden de ideas, los potenciales ingresos por venta de CER, que se tasan en valores que se encuentran entre los US 5.00 y 15.00 por tCO₂eq mitigado (Mayer *et al.*, 2018), afectarían positivamente el análisis financiero aumentando la viabilidad de la implementación de la tecnología escogida.

Por último, en el análisis del modelo, es importante mencionar que, para el estudio de caso desarrollado en esta investigación, se asumió que las instalaciones para cogeneración se establecerán en un espacio proporcionado por la empresa aledaño a las instalaciones actuales, con lo cual no se tienen gastos asociados con el transporte del residuo hasta la planta de cogeneración, disminuyendo considerablemente los costos asociados al proyecto y por lo tanto afectando de manera positiva los análisis financieros.

Conclusiones

Como resultado del estudio, se puede decir que las políticas económicas, medioambientales y energéticas juegan un papel importante en el desarrollo de

proyectos a partir de residuos del arroz como combustible para las industrias energéticas.

Como resultado del análisis financiero se puede evidenciar que los valores de los parámetros de VAN y TIR son favorables en ambos escenarios, sin embargo, para el segundo escenario los valores muestran una mejora con respecto al primer escenario. Conviene subrayar que los proyectos de generación a partir de biomasa se encuentran enmarcados dentro de los proyectos MDL (mecanismo de desarrollo limpio) lo que les permite recibir créditos certificados de reducción de emisiones (CER) que pueden ser convertidos en recursos monetarios que mejoren los resultados del análisis financiero

Además de lo anterior, se debe mencionar que para el caso de empresas con pequeña escala (clasificadas como tipo III y IV), el financiamiento siempre será un obstáculo al momento de la escogencia de tecnologías, todo esto debido a que algunas de ellas son viables financieramente solo para grandes cantidades del residuo, sin embargo, a partir de la ejecución del modelo, se puede evidenciar que la aplicación de los incentivos tributarios para proyectos de cogeneración, afectan de manera significativa el análisis financiero debido a que se presenta una disminución sustancial del valor a invertir (aproximadamente un 30 %) y por lo tanto mejoran los resultados de los parámetros financieros tomados como base para los tomadores de decisiones.

Otro aspecto a tener en cuenta en el modelo es la incorporación del aprovechamiento de la ceniza resultante, esta puede ser comercializada como aditivo

a la mezcla de concretos de alta resistencia o ser vendida a la industria cementera local lo que mejoraría sustancialmente los resultados del análisis financiero y mejoraría el desempeño ambiental del proceso.

En síntesis, se puede decir que la cogeneración se presenta como una verdadera posibilidad para el aprovechamiento del residuo agroindustrial de la cascarilla, que le da a las empresas la posibilidad de mejorar su competitividad y debe ser considerado con un mayor nivel de detalle a diferentes escalas y con diferentes opciones tecnológicas para su valoración desde los aspectos técnico, financiero y ambiental.

Referencias

- Becerra, I. C., Díaz, A. M., García, E., Maluendas, A. V., Quintero, L. E., Reina, D., Ríos-Ortegón, M., Samacá, H. y Viveros, J. S. (2018). *Análisis situacional cadena productiva del arroz en Colombia*. <https://bit.ly/3ISVbF3>.
- Bueno, M., Rodríguez, L. y Rodríguez, P. (2016). Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano. *Ingeniería y Desarrollo*, 34(2), 397-419. <https://bit.ly/3MMCFiU>.
- Carbon Trust. (2019). *Herramienta de evaluación de externalidades. Modelo para fuentes no convencionales de energía*. <https://acortar.link/mPZdow>.
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de la biomasa. *Cuadernos Económicos de ICE*, (83), 117-140. doi: 1032796/cice.2012.83.6036.
- International Energy Agency. (2019). *World Energy Outlook 2019*. <https://bit.ly/3MQFNtQ>.
- Lim, J. S., Abdul Manan, Z., Wan Alwi, S. R. and Hashim, H. (2012). A review on utilization of biomass from the rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3084-3094. <https://bit.ly/3NaCkYp>.
- Rincón, J. y Silva, E. (Eds.). (2014). *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad*. Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía. <https://ianas.org/wp-content/uploads/2020/07/ebp01.pdf>.
- Shafie, S. M. (2016). A review on paddy residue-based power generation: Energy, environment, and economic perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1089-1100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.038>.
- Sims, R., Flammini, A., Puri, M. and Bracco, S. (2015). *Opportunities for Agri-Food Chains to become Energy-Smart*. <https://bit.ly/3IQpPP9>.
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2019). *Registro de proyectos de generación (inscripción según requisitos de las Resoluciones UPME n.º 0520, n.º 0638 de 2007 y n.º 0143 de 2016)*. <https://acortar.link/LkzYnf>.

Valverde, A., Sarria López, B. y Monteagudo Yanes, J. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, 5(37), 255-260. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4784298>.