

Tecnología para la obtención de energía eléctrica a partir de residuos forestales en la Empresa Agroforestal (EAF) Macurijes, Cuba

Technology for obtaining electric energy from forestry residues at the Macurijes Agroforestry Enterprise (EAF), Macurijes, Cuba

Bertha Rita Castillo Edua

Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales y Agropecuarias.
Universidad de Pinar del Río, CUBA
daycrist@upr.edu.cu // bertharita1972@gmail.com

Zhofre Aguirre Mendoza

Universidad Nacional de Loja, ECUADOR

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la propuesta de tecnología para un proceso de generación de energía eléctrica a partir de los residuos del aprovechamiento forestal de la Empresa Agroforestal Macurijes. Para lo cual se analiza una propuesta de tecnología de caldera de vapor en función de las potencialidades de la biomasa forestal en pie y de residuos forestales así como análisis la factibilidad del proyecto de inversión de la tecnología. Como resultados se obtiene 6 MWh de generación de la turbina acoplada al generador eléctrico en función de 62 000 toneladas anuales, 1 666 t/día que representan alrededor de 7/t/ horas con una caldera que produzca vapor a 25 atm o bar a 460 °C en 7 000 horas año como consecuencia de paradas por mantenimiento periódicos. La tecnología a emplear debe ser de calderas de vapor, ya que las mismas trabajan a alta presión son más fáciles de limpiar, evacuan las cenizas, productos de la combustión y son más seguras en su operación y que PCS promedio de 2,7 kcal/kg con una humedad del 40 % como consecuencia de la combinación de una biomasa heterogénea compuesta por varias especies forestales y el tratamiento previo que a esta se le dé.

Palabras clave: tecnología, residuos, biomasa forestal, energía eléctrica

Abstract

The objective of this investigation was to evaluate the technology proposal for a process of generating electrical energy from the residues of the forest exploitation of the Macurijes Agroforestry Company. For which a proposal for steam boiler technology is analyzed based on the potential of standing forest biomass and forest residues, as well as an analysis of the feasibility of the technology investment project. As a result, 6 MWh of generation is obtained from the turbine coupled to the electric generator based on 62,000 tons per year, 1,666 t/day, which represents around 7/t/ hours with a boiler that produces steam at 25 atm or bar at 460 degrees Celsius in 7,000 hours per year as a result of periodic maintenance stops. The boiler to be used must have water tubes since they work at high pressure, are easier to clean, evacuate ashes, combustion products and are safer in their operation and that average PCS of 2,7 Kcal/kg with a humidity of 40 % as a result of the combination of a heterogeneous biomass composed of several forest species and the previous treatment given to it.

Keywords: technology, waste, Forest biomass, electric energy.

Citación: Castillo, B. & Z. Aguirre. 2023. Tecnología para la obtención de energía eléctrica a partir de residuos forestales en la Empresa Agroforestal (EAF) Macurijes, Cuba. *Arnaldoa* 30 (2): 259-272 doi:<http://doi.org/10.22497/arnaldoa.302.30212>

Introducción

La biomasa forestal en un contexto energético se refiere al conjunto de elementos renovables de origen orgánico o sus derivados, cuya energía procede de la radiación solar transformada en energía química de enlace, durante el proceso de fotosíntesis realizado por las especies vegetales (Manzano *et al.*, 2012).

Esta energía química puede ser utilizada directamente a partir de procesos de combustión o ser transformada mediante

métodos térmicos (gasificación) o biológicos (producción de Bioetanol), de acuerdo al requerimiento final de uso (Yáñez *et al.*, 2020). En general se habla de biomasa como materia viva, de la cual se puede aprovechar su potencial energético para la generación de energía o combustibles aprovechables por el hombre.

Los ecosistemas forestales son la fuente más importante de biomasa lignocelulosa en el mundo, en la mayoría de los casos se valoran por el volumen aprovechable por la industria. La biomasa en forma de madera

es la fuente de energía más antigua usada por la humanidad, tradicionalmente su energía se ha usado a través de combustión directa y este proceso es ampliamente usado alrededor del mundo. La bioenergía tiene el potencial de ser “mundialmente modernizada”, producida y utilizada de forma eficiente a un costo competitivo, usando tecnologías que la conviertan a gas, líquido, o electricidad directa. En la actualidad, el uso de residuos forestales como fuente de biomasa para la generación de bioenergéticos representa una alternativa potencial (Ayala- Mendivil, *et al.*, 2018).

De esta forma, hay una cantidad de biomasa que queda subestimada con potencial de ser una importante fuente de energía y se puede transformar en combustible sólido, líquido o gaseoso, para sustituir los combustibles fósiles a bajos niveles de inversión y alta rentabilidad (Guyat *et al.*, 2019)

En este sentido, una solución reconocida a esta problemática es incorporar estos residuos forestales en las cadenas de valor para la bioenergía. La cadena de bioenergía, a partir de biomasa forestal, tiene cuatro eslabones principales: producción de la materia prima; procesos de transformación de ese insumo principal en biocombustible; biocombustible con características y propiedades específicas y finalmente uso de ese biocombustible en la obtención de bioenergía para dar diferentes servicios energéticos (Zequeira *et al.* (2021).

En este sentido, las tecnologías modernas de aprovechamiento, transformación y uso final de biomasa forestal para energía todavía no han sido adoptados y utilizados en la medida de su potencial. La biomasa forestal puede tener dos roles principales como fuente de energía: como combustible no procesado, en aplicaciones térmicas tradicionales, domésticas o artesanales (leña

para cocción, calefacción, secado, generación de vapor o calor directo), o como diferentes combustibles procesados (astillas, braquetas, pellets de madera, carbón vegetal, pyro-oil, syngas) utilizables en aplicaciones térmicas y termoeléctricas industriales para generar vapor, calor, y/o electricidad (Trujillo, 2020).

Algunas investigaciones señalan el potencial del uso de los residuos de la industria forestal para la generación de energía, alegando que los mejores rendimientos de generación de bioenergía y disminución de los gases de efecto invernadero, se obtienen en los procesos que utilizan estos residuos como materia prima, ya que se evita el impacto ambiental de la producción de cultivos específicos (Cherubini *et al.*, 2009; McKechnie, 2011). Esta energía química puede ser utilizada directamente a partir de procesos de combustión o ser transformada mediante métodos térmicos (gasificación) o biológicos (producción de Bioetanol), de acuerdo al requerimiento final de uso (Yaman, 2004; Yáñez *et al.*, 2020).

En Cuba se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas con la producción de energía a partir de residuos forestales, entre los que es posible mencionar:

Lesme *et al.* (2011) realizaron la evaluación de un sistema gasificador/motor de combustión interna, para determinar las mejores condiciones de operación del gasificador, la calidad del gas que produce y la potencia eléctrica que se puede generar en el motor.

Zequeira *et al.* (2021) elaboraron una metodología para la zonificación del potencial de biomasa con fines energéticos orientada a empresas forestales, considerando que el uso de la biomasa forestal para la producción de energía representa una de las alter-

nativas actuales que considera el país para su desarrollo energético.

Asimismo, Rubio (2022) determinó el comportamiento de la humedad, masa orgánica y el calor específico de combustión del marabú cosechado con máquinas, para prever su impacto en la operación de las calderas para tomar previsiones y garantizar su correcta utilización.

Teniendo en cuenta estos antecedentes y la existencia de gran cantidad de residuos de la industria forestal que provoca un impacto ambiental, así como, el déficit de corriente eléctrica existente en la localidad, se hace necesario elaborar una propuesta que contribuya a la producción de energía eléctrica para la Industria de transformación primaria y secundaria de la madera, en la Empresa Agroforestal Macurijes y las comunidades aledañas.

La presente investigación tuvo como objetivo proponer una tecnología para la obtención de energía eléctrica para la industria de transformación primaria y secundaria de la madera, a partir de los residuos forestales en la Empresa Agroforestal Macurijes ubicada en la provincia de Pinar del Río, Cuba.

Metodología

La investigación se desarrolló en La Empresa Agroforestal Macurijes (E.A.F Macurijes) localizada en la región occidental de Cuba, en la provincia de Pinar del Río, abarca el patrimonio forestal de los municipios Guane y Mantua. Limita al noreste con el municipio Minas de Matahambre (E.A.F Minas de Matahambre) al oeste y noroeste con el Archipiélago de los Colorados entre la Ensenada de Baja y la Ensenada de Garnacha, en el litoral del Golfo de México, donde se encuentran: la cayería de Limones, Cayo Diego, Cayo Rapado Grande,

Cayo Rapado Chico y Cayo de Buena vista; al este limita con el municipio San Juan y Martínez (E.A.F Pinar del Río); al Sur con el municipio Sandino (E.A.F Guanahacabibes) y al Sureste con el litoral del mar caribe comprendido entre las desembocaduras de los ríos Cuyaguateteje y Puercos (ver figura 1).



Fig. 1. Localización geográfica de la Empresa Agroforestal Macurijes.

Según el proyecto de organización y desarrollo de la economía forestal 2019- 2028 (Aldana, 2019) la superficie total de la empresa es de 86 603 hectáreas. Distribuidas en dos unidades empresariales básicas Rio Mantua con 45 245 ha (52,2 %) con 133 lotes y 8 253 rodales y la unidad empresarial básica silvícola Los Ocujes con 41 358 ha (47,8 %) con 124 lotes y 2 556 rodales.

El área boscosa de la empresa es de 74 034,1 hectáreas, por lo que este volumen de tala total de 228 407 m³ significa que se pueden extraer anualmente 3 m³ de madera por cada hectárea cubierta de bosque. El volumen de madera aprovechable de 206 628, 9 m³ aporta un volumen de madera activa, es decir de bolos y rollizas de 144 639,6 m³, pues el 70 % del volumen de madera aprovechable corresponde al volumen de madera activa. De este volumen de madera activa el 45% corresponde al volumen de madera en bolo. Asimismo, el volumen de madera en bolo que se obtiene considerando todos

los tipos de corta es de 92 983,0 m³.

Se calculó la biomasa forestal a partir de la fórmula propuesta por Mercadet y Álvarez (2009).

$$BM_f = V_f * D_e / 1000$$

Donde:

De: Densidad específica para cada especie (kg/m³)

BM_f - Biomasa del fuste (t)

Densidad de la madera:

Dicrostachys cinerea (marabú): 1,11-1,23 g/cm³.

Pinus caribaea var. caribaea Morelet Barret y Golfari (pino macho): 1,194 -126 g/cm³

Eucalyptus sp: 1,20 g/cm³

El valor de la biomasa del fuste fue ajustado ya que no incluye la totalidad del árbol (ramas y follajes) a partir del factor de ex-

pansión (FEB), señalado por Brown (1997) citado por Rodríguez (2005) aplicando la siguiente expresión:

$$BMT = BM_f * FEB * S$$

Dónde: BMT: Biomasa total (t)

BM_f: Biomasa del fuste (t)

FEB: Factor de expansión de la biomasa (ramas y follaje) = 1,74

S: superficie

Para el caso de la biomasa de *Pinus caribaea* (pino macho) de ramas y follaje también se empleó las ecuaciones encontradas por Vidal *et al.* (2004).

$$\text{Log B. F.} = 0,6886 + 1,5009 * \text{Log dap} + C$$

B.F: Biomasa de follaje

Donde:

$$C = 0,150178$$

$$\text{Log B. R} = -1,1686 + 1,9066 * \text{Log dap} + C$$

Donde:

B.R: Biomasa de ramas

$$C = 0,270603$$

Estos resultados permitieron realizar el análisis de las tecnologías existentes para la producción de energía partir de los residuos forestales y proyectar el flujo tecnológico de la tecnología de producción de energía eléctrica en función de las capacidades de residuos forestales existentes.

La tecnología propuesta se realizó a partir de los resultados de las tecnologías existentes, así como las potencialidades y disponibilidad de biomasa de residuos existentes en la Empresa Agroforestal Macurijes (figura 2).



Fig. 2. Residuos del aprovechamiento forestal en la Empresa Agroforestal Macurijes

Resultados y discusión

Selección de la tecnología

La tabla 1 resume las principales tecnologías mencionadas y sus aplicaciones.

Tabla 1. Resumen de las tecnologías y sus principales aplicaciones.

Tecnología	Principal producto	Principal aplicación
Combustión	Calor	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de potencia usando turbinas de vapor. • Sistemas de Calefacción.
Pirolisis	Bio - crudo	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de combustibles líquidos y otros derivados del crudo.
Gasificación	Gas Metano	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de potencia usando motores a gas. • Sistemas de calefacción.
Digestión Anaerobia	Gas Metano	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de potencia usando motores a gas. • Sistemas de calefacción.
Licuefacción	Bio- Crudo	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de combustibles líquidos y otros derivados del crudo.
Fermentación	Etanol	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de bio combustibles líquidos principalmente para el transporte.

McKendry (2002) afirma que lo primero que se debe determinar en un proyecto de generación de energía a partir de biomasa, es la forma final de uso de esta energía, con el fin de diseñar una hoja de ruta adecuada.

Determinación de las potencialidades de biomasa de las principales especies del aprovechamiento.

La tabla 2 muestra las potencialidades de biomasa por principales especies del aprovechamiento en plantaciones y de marabú naturalmente.

Tabla 2. Potencial biomasa EAF Macurije

Fuente de biomasa	m ³ /año	t/año @@@{Oño
Residuos de la industria (Total)	12 267	9 117
De pino	12 108	8 960
De eucalipto	159	157
Tala rasa plantaciones degradadas de Eucalipto	5 746	5 660
Desmante de Marabú / Plantaciones energéticas	19 643	21 607
Residuos de tala rasa, raleo y limpieza de marabú de plantaciones	58 705	45 656
Pino	52 555	38 891
Marabú limpieza de plantaciones	6 150	6 765
Total	96 361	82 040

Las principales especies de aprovechamiento en las plantaciones son los residuos de tala rasa, raleo y limpieza de marabú de plantaciones con 58 705 m³/año y 45 656 t/año.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Paredes (2015) quien utilizó la biomasa de marabú para generar energía eléctrica.

Reyes *et al.* (2018) diseñaron una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos, a partir de las potencialidades de dicha especie.

Disponibilidad de biomasa de residuos del aprovechamiento

En la tabla 3 por su parte se muestra la disponibilidad de biomasa de residuos del aprovechamiento y de la silvicultura en relación a la limpieza de Marabú.

Tabla 3. Disponibilidad de biomasa

Fuente de biomasa	m ³ /año	t/año
Residuos de la industria (Total)	12 267	9 117
De pino	12 108	8 960
De eucalipto	159	157
Tala rasa plantaciones degradadas de Eucalipto	5 746	5 660
Desmante de Marabú / Plantaciones energéticas	19 643	21 607
Residuos de tala rasa, raleo y limpieza de marabú de plantaciones.	39 533	31 648
Pino	33 383	24 703
Marabú limpieza de plantaciones	6 150	6 765

La tabla muestra que la mayor disponibilidad de biomasa de residuos del aprovechamiento y de la silvicultura es de los residuos de tala rasa, raleo y limpieza de marabú de plantaciones con un total de 39 533 m³/año y 31 648 t/año.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Rubio *et al.* (2021) en un estudio sobre las propiedades del marabú cosechado con máquinas como combustible, para la generación de electricidad en el central azucarero Ciro Redondo.

Estudios similares fueron realizados por Toirac *et al.* (2018) al determinar modelos de biomasa área verde en plantaciones de *Pinus maestrensis* Bisse. Zequeira *et al.* (2021) elaboraron una metodología para la zonificación del potencial de biomasa con fines energéticos orientada a empresas forestales. Gregorio (2020) en España hizo un análisis de la situación de la biomasa mostrando que el balance económico de esa actividad es positivo y sugiere un conjunto de medidas encaminadas a aprovechar las oportunidades para desarrollar la bioeconomía.

Además estos autores coinciden en la importancia del uso de residuos de la biomasa desde el punto de vista económico, por su vínculo con la implementación de los planes de manejo y su relación con la planificación de las operaciones en el aprovechamiento forestal, permitiendo un ahorro de recursos, fuerza de trabajo, materiales y equipos para las Empresas Agroforestales.

La tecnología seleccionada por la potencia a instalar es la de ciclo de Caldera de vapor (figura 3).

La tecnología seleccionada por la potencia a instalar será la de ciclo de Caldera de vapor (Figura 4 y 5).

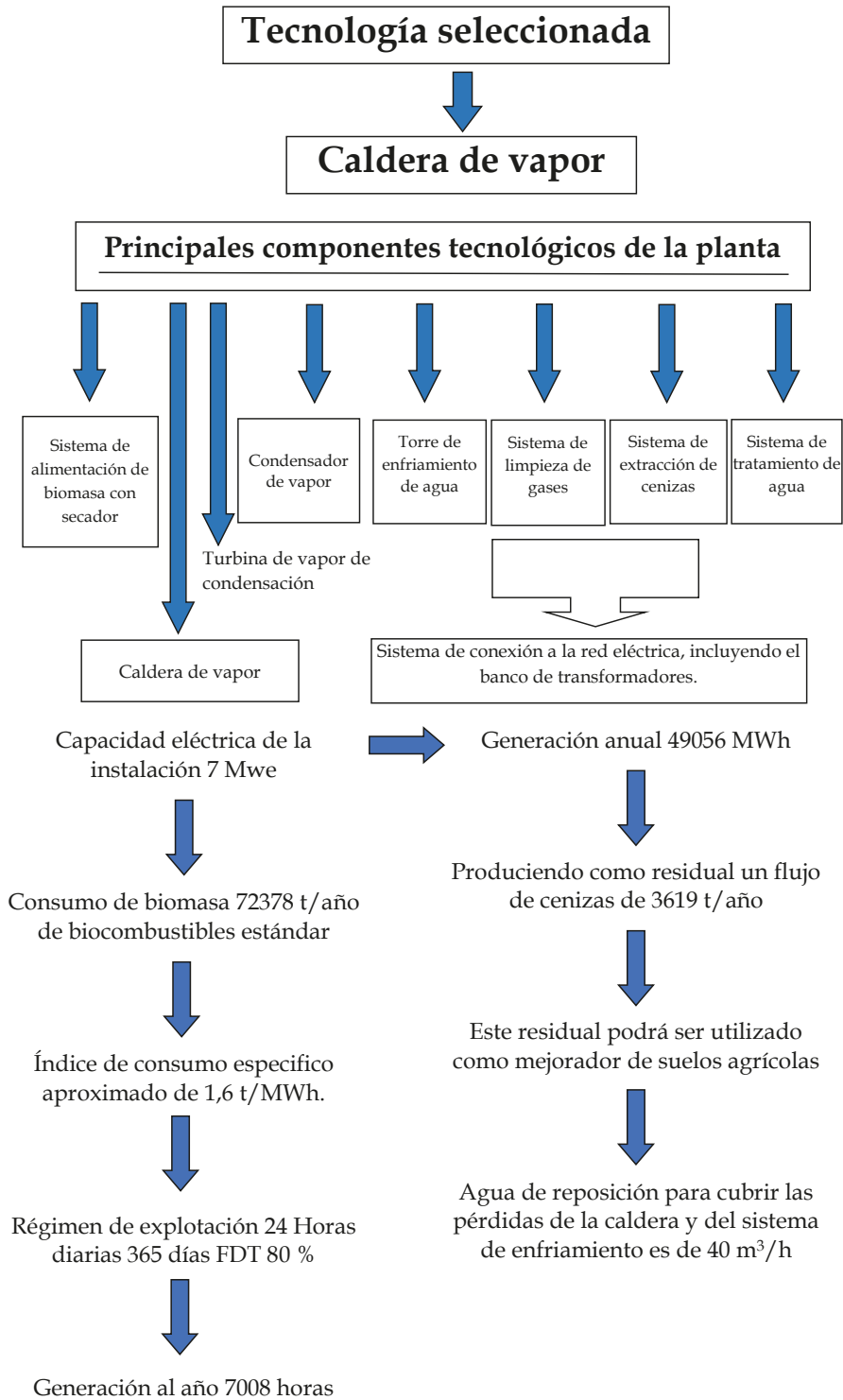


Fig. 3. Tecnología propuesta para la producción de energía de biomasa

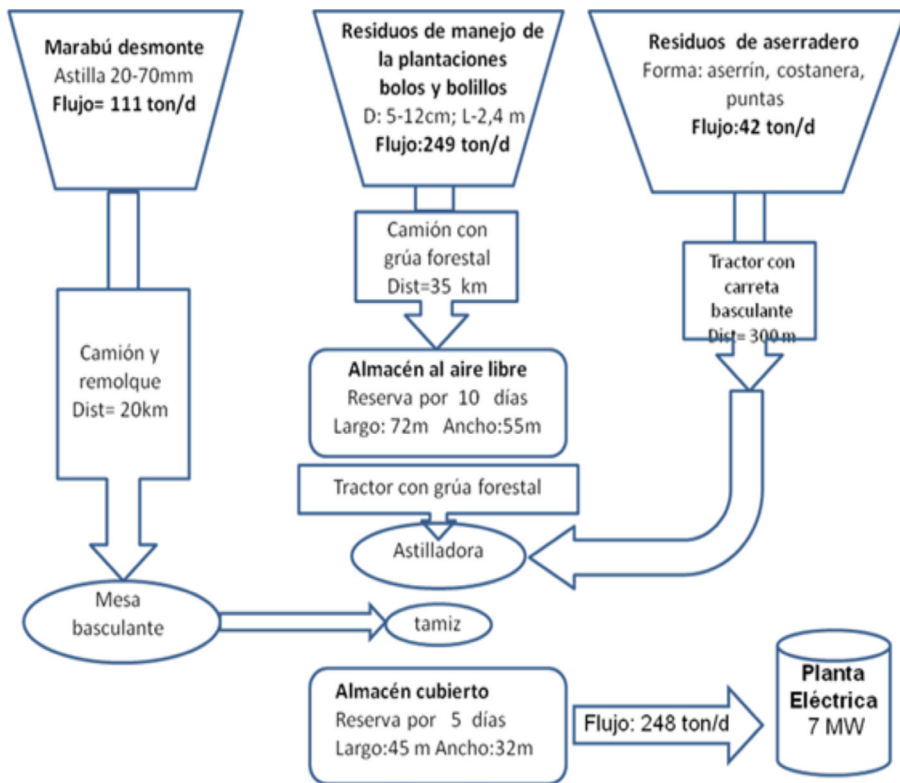


Fig. 4. Ciclo de Caldera de vapor.

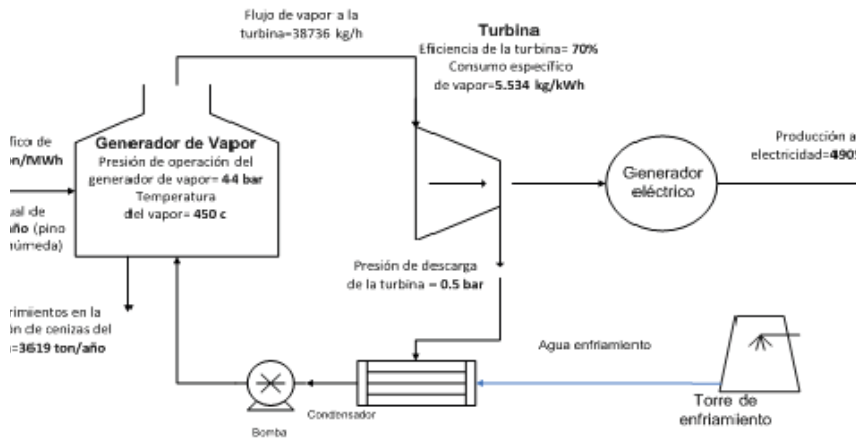


Fig. 5. Esquema tecnológico patio de biomasa

La figura 6 muestra el esquema de la tecnología de generación de electricidad

Fig. 6: Esquema de la tecnología de generación de electricidad

Evaluación económica de la tecnología propuesta

Valor de las ventas

El valor de las ventas anuales se calculó sobre la base de considerar un precio promedio de venta de electricidad según el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de 150 MLC/MWh y 250 MT/MWh. Con el propósito de alcanzar una rentabilidad aceptable de la inversión se asumió que en el precio de pago del préstamo (8 años) este precio sería de 185 USD/MWh y 308 MT/MWh, durante los años restantes estos precios serán 127 USD/MWh y 211 MT/MWh.

Componentes de Inversión	MM MLC	MM MT
Equipos y maquinarias	37,32	42,51
Construcción y montaje	3,30	9,84
Otros gastos	0,16	2,45
Capital de trabajo	0,94	1,67
Total de inversión	41,73	56,47

Indicadores económicos

El análisis de los indicadores económicos muestra que los resultados obtenidos son positivos.

El Valor Actual Neto (VAN) calculado con una tasa de actualización hasta el 14 % es mayor que cero en todos los casos. Las tasas internas de retorno (TIR) son satisfactorias con un valor del 15 % en MT y un 13,42 % en USD. El periodo de recuperación de la inversión resulta en 6,71 y 7,15 años en MT y USD respectivamente.

Evaluación Económica

El valor de la inversión asciende a 56,47 millones de pesos en MT, con un componente en divisas de 41,73 millones de USD. VAN es mayor que cero en todos los casos por lo que los flujos son positivos. TIR es satisfactoria con un valor del 15 % en MT y un 13,42 % en USD. El periodo de recuperación de la inversión es de 6,71 en MT y 7,15 años en USD respectivamente.

Efectos en divisas externas

Los ahorros asociados a esta inversión están dados por el combustible convencional importado que se sustituye en la generación de electricidad.

Precio del combustible /ton 559 USD /t y una equivalencia de 5,06 ton de pino al 25 % de humedad/ ton de combustible convencional sustituido en la generación de electricidad. El efecto de la inversión en el flujo de divisas externa resulta positivo desde el primer año obteniéndose un VAN 20, 2 y 17, 2 millones de USD al calcularse al 10 y 12 %.

Las ventajas del aprovechamiento del biogás con fines de producción de energía eléctrica son, reducir las emisiones de gases efecto invernadero (Paolini *et al.* 2018) y obtener ganancias económicas por la comercialización de electricidad (Vargas y González, 2019).

Conclusiones

La tecnología propuesta por la potencia a instalar es la de ciclo de Caldera de vapor ya que trabajan a alta presión son más fáciles de limpiar, evacuan las cenizas, productos de la combustión y son más seguras en su operación. El PCS promedio de 2,7 kcal/kg con una humedad del 40 % como consecuencia de la combinación de una biomasa heterogénea compuesta por varias

especies forestales y el tratamiento previo que a esta se le dé. De acuerdo al estudio realizado sobre la biomasa que se puede recolectar en un año (62 000 t) y estableciendo que la planta trabaje 7 000 horas en un año teniendo en cuenta las paradas por mantenimiento periódicos debe consumir 1 666 t/día que representan alrededor de 7/t/horas alimentando una caldera que produzca vapor a 25 atm o bar a 460 °C y esta hacer una turbina acoplada a un generador eléctrico que entregue 6 MWh.

Literatura citada

- Aldana, E.** 2019. Proyecto de organización y desarrollo de la economía forestal 2019 – 2028 de la Empresa Agroforestal Macurijes.
- Ayala-Mendivil, N.; G. Sandoval.** 2018. Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y bosques*. 24(SPE).
- Akhtari, S.; T. Soelat & K. Dahy.** 2014. Economic feasibility of utilized forest biomass in district energy systems. A review, 33: 117-127. doi:10.1016/j.rser.2014.01.058.
- Guyat, M. A.; M. Plá Duportel & M. Arango.** 2019. Evaluación de la biomasa disponible para la generación de energía en Cuba. *Revista Forestal Baracoa* 38(2): 712. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4632274>.
- Gregorio, M.** 2020. Biomasa en España. Generación de valor añadido y análisis prospectivo. International Energy Agency. Technology Without Borders. Case studies of successful technology transfer, International Energy FEDEA.
- Lesme, R.; J. Martínez; A. Viera & E. Silva.** 2011. Evaluación teórico experimental de un sistema avanzado gasificador de biomasa/motor reciprocante para la generación de electricidad. Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Universidad de Oriente Cuba. *Revista Tecnología Química*. 31(3): 23-30.
- McKendry, P.** 2002. Energy production from biomass. Part II: Conversion Technologies. *Journal of Bioresource Technology*. Bioresource Technology, 3(83): 47-54.
- Mercadet, P. A. & B. A. Álvarez.** 2009. Metodología para establecer la línea base de retención de carbono en las Empresas Forestales Integrales de Cuba.
- Paolini, V.; P. Francesco; M. Segreto; N. N. Tomassetti & C. Angelo.** 2018. Environmental impact of biogás: A short review of current knowledge. *Journal of environmental Science and Health Part A* 53 (10): 899-906. DOI.ORG/10.1080/10934529.2018.1459076.
- Rubio, A.; P. Iturria; L. Rodríguez & D. Palmero.** 2021. Propiedades del Marabú coechado con máquinas como combustible para la generación de electricidad.
- Reyes, Y.; M. Pèrez; N. Ley-Chong & L. Artega.** 2018. Diseño de una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos. Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spiritus, Cuba. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Central Marta Abreu de las Villas. ISSN 2224-185 VOL.XXXVIII, No 1 2018.
- Rubio, G. A.** 2022. Comportamiento de la humedad, la masa orgánica, y el calor específico de combustión del marabú almacenado. *Revista Centro Azúcar*, Vol. 49, No 4, 48-57.
- Toirac, Argueyes, W.; A. Vidal Corona & H. Barrero Medel.** 2018. Modelo de biomasa área verde en plantaciones de *Pinus maestrensis* en la Sierra Maestra, Cuba. *Revista Avances*, 20(3): 254-263.
- Trujillo, R.** 2020. Producción de energía a partir de la biomasa: una revisión sistemática, Ruby Lara. Universidad Santo Tomas Facultad de Ingeniería Ambiental Maestría en Tecnologías Limpias Bogotá.
- Vargas, H. & J. González.** 2019. Municipal urban waste to energy business model in Mexico: a study of three companies. *Bahia Analise & dados* 28 (2): 272-291. <https://bit.ly/3NV3EBR>.
- Yaman, S.** 2004. 'Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks', *Energy Conversion and Management*. 45(5): 651-671. doi: 10.1016/S0196-8904(03)00177-8.
- Yáñez-Iñiguez, L.; E. Urgilés-Urgilés; E. Zalamea-León & A. Barragán-Escandón.** 2020. Potencial de los Residuos Forestales para la contribución a la Matriz Energética Urbana. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 32(2): 42-53. <http://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.04>.
- Zaqueira, L. D.; B. I. Garea & A. J. A. Curbelo.** 2021. Metodología para la zonificación del potencial de biomasa con fines energéticos orientada a empresas forestales. Caso empresa agroforestal La Palma. *Revista CFOREs*, 9(3): 440-453.

