

## **Alternativas para el uso del biogás obtenido a partir de vinazas de caña de azúcar, en la destilería “Melanio Hernández”, Sancti Spíritus**

Alternatives for the use of biogas obtained from sugarcane vinasses in the “Melanio Hernández” distillery, Sancti Spíritus

Maura Irene Pérez-Sosa<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0005-6534-6857>.

Lisbet Mailin López-González<sup>2\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>

Julio Pedraza-Garciga<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1780-5297>

Ernesto Luis Barrera-Cardoso<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0207-4188>

<sup>1</sup>UEB Derivados “Melanio Hernández”. Sancti Spíritus, Cuba

<sup>2</sup>Universidad de Sancti Spíritus “José Martí”, Unidad de Desarrollo e Innovación Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (UDI-CEEPI). Sancti Spíritus, Cuba

\*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: [llopez@uniss.edu.cu](mailto:llopez@uniss.edu.cu)

### **RESUMEN**

El trabajo evalúa desde el punto de vista técnico, económico y ambiental las alternativas para el uso del biogás producido a partir de las vinazas en la destilería “Melanio Hernández”, de la provincia de Sancti Spíritus, Cuba. En la investigación se consideraron tres posibles usos del biogás (generación de energía térmica, generación de energía eléctrica y térmica, y cocción de alimentos). La metodología se basó en balances de materiales y de energía, así como los indicadores económicos dinámicos de la inversión. Se obtuvo un potencial de producción de biogás de 25 539 m<sup>3</sup>/d, correspondiente a un índice de 25 m<sup>3</sup> de biogás/m<sup>3</sup> de vinazas. El reemplazo del consumo de fuel oil en la caldera de la destilería por biogás fue la alternativa con mayor ingreso anual para la empresa, valorado en 35,6 millones de pesos (CUP), sin embargo, para el país se obtiene un mayor ingreso (\$1,17 millones USD) cuando se combina la alternativa anterior con la electricidad ahorrada en la cocción de alimentos.

La alternativa más atractiva económicamente fue la de sustitución de fuel oil por biogás, con VAN=\$1 786 582,63, TIR=26% y PRD de 5,6 años, mientras que la alternativa con mayor reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> fue la que considera el reemplazo de la electricidad por biogás. La digestión anaerobia de las vinazas de la producción de etanol puede reducir el consumo de fuel oil y electricidad en el proceso de producción de alcohol, a la vez que se reduce su alta carga contaminante.

**Palabras clave:** vinaza; biogás; electricidad; generación de vapor; fuel oil.

### **ABSTRACT**

The work evaluates from a technical, economic and environmental point of view the alternatives for the use of biogas produced from vinasses in the “Melanio Hernández” distillery, Sancti Spíritus province, Cuba. In the research, three possible uses of biogas were considered (thermal energy generation, electrical and thermal energy generation, and food cooking). The methodology was based on material and energy balances, as well as dynamic economic indicators of the investment. A biogas production potential of 25 539 m<sup>3</sup>/d was obtained, corresponding to an index of 25 m<sup>3</sup> of biogas/m<sup>3</sup> of vinasses. The replacement of fuel consumption in distillery boiler with biogas was the alternative with the highest annual income for the company, valued at 35,6 million CUP, however, for the country a greater income is obtained (\$1,17 million USD) when the previous alternative with the electricity saved in cooking food. The dynamic indicators of the investment were better for the alternative of replacing fuel oil with biogas, with NPV=\$1 786 582,63, TIR=26% and PRD of 5,6 years, while the alternative with the greatest reduction in CO<sub>2</sub> emissions was the one that considers the replacement of electricity with biogas. The anaerobic digestion of vinasses from the production of ethanol can reduce the consumption of fuel oil and electricity in the alcohol production process, while reducing its high pollution load.

**Keywords:** Sugarcane vinasse; biogas; electricity; steam generation; fuel oil.

Recibido: 18/01/2025

Aceptado: 28/04/2025

## Introducción

Es un aspecto bien conocido que el 90 % de las necesidades energéticas del planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón o el gas natural. Todos ellos extinguidos, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente, por el interés predominante de la producción de energía sobre el de su efecto ecológico. <sup>(1)</sup> Por tanto, la transición energética hacia energías renovables y limpias constituye un compromiso mundial. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable <sup>(2)</sup> se necesita una aceleración significativa en todos los sectores energéticos, desde una electrificación más profunda del transporte, el calor para uso final, hasta el uso directo de las energías renovables.

La necesidad de potenciar el aprovechamiento de las distintas Fuentes Renovables de Energía (FRE), es un camino impostergable para Cuba y está incluido en los Lineamientos del Partido Comunista de Cuba. <sup>(3)</sup> Si bien en el compromiso del país de alcanzar el 24 % de la generación de energía con FRE se incluyen principalmente la solar fotovoltaica, la biomasa y la eólica, el biogás, puede significar un ahorro en electricidad o diésel consumido, lo cual resulta un aporte significativo en la crisis energética actual.

Dentro de los sustratos con mayor potencialidad en el país para la producción de biogás están las vinazas generadas en las destilerías de alcohol. Este es un residuo de composición compleja, con un pH ácido, alta Demanda Química de Oxígeno (DQO) (46-65 kg/m<sup>3</sup>), color oscuro por la presencia de melanoidinas, alto contenido de potasio, así como de fósforo, calcio y nitrógeno. El vertimiento de vinaza en cuerpos de agua causa la reducción del contenido de oxígeno disuelto, su almacenamiento en lagunas de oxidación es una fuente de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), su aplicación al suelo incrementa el contenido de potasio a niveles tóxicos, así como de metales pesados con efectos carcinogénicos. <sup>(4)</sup>

En Cuba la disposición de vinazas, directa e indirectamente a cuerpos de agua está prohibido. El tratamiento de las vinazas se realiza generalmente en lagunas de oxidación y luego su disposición es como fertirriego de plantaciones de caña de azúcar, sin embargo, esta técnica puede tener impactos negativos, causando la lixiviación de iones a cuerpos de agua subterránea, contaminando

aguas superficiales y el suelo. <sup>(5)</sup> Las emisiones de GEI por el almacenamiento en lagunas, y la toxicidad de los suelos por las aplicaciones repetidas, son otros de los efectos de la incorrecta disposición de las vinazas.

El consumo energético de una destilería se caracteriza por la presencia de diferentes portadores energéticos, de los cuales los más representativos son el fuel oil, utilizado en la generación de vapor de la caldera y la electricidad. La digestión anaerobia de las vinazas se considera una alternativa prometedora ya que puede mejorar el balance energético en la producción de etanol, a la vez que reduce el impacto ambiental por la incorrecta disposición de las vinazas. Atendiendo a lo planteado se propone como objetivo general de esta investigación evaluar técnica, económica y ambientalmente las alternativas para el uso del biogás obtenido a partir de las vinazas generadas en la destilería “Melanio Hernández”.

## **Materiales y métodos**

### **Caracterización de la destilería “Melanio Hernández”**

La empresa azucarera “Melanio Hernández” es un complejo azucarero con destilería anexa, con una molida potencial de 4000 t/d y una capacidad de producción de 700 hL/d de alcohol a 100 °GL.

En la destilería, nombrada “Melanio Hernández”, la materia prima utilizada es miel final del proceso de producción de azúcar. En tiempo de zafra (90 días), las utilidades (vapor, agua y electricidad) provienen de la sección de crudo del central, mientras que en tiempo inactivo opera de forma autónoma, quema fuel oil como combustible para generar el vapor necesario en la destilería y procesa miel almacenada proveniente del mismo central y otros tributarios. Se consideran 270 días de trabajo y una explotación de la destilería al 90 % de su capacidad potencial.

En el proceso de producción de alcohol se genera un flujo de 1610 m<sup>3</sup>/d de aguas residuales (2,3 m<sup>3</sup>/hL), provenientes de las etapas de enfriamiento, fermentación y destilación, así como las aguas resultantes de las operaciones de enjuague de la levadura, limpieza y desinfección. Las vinazas, el residuo del proceso de destilación, constituyen el residual más contaminante con un flujo de 1120 m<sup>3</sup>/día (1,6 m<sup>3</sup>/hL). La concentración de las vinazas es superior a

60 g/L de DQO, según valores reportados en investigaciones anteriores que utilizaron las vinazas de esta destilería como sustrato (tabla 1).<sup>(6, 7)</sup> Las aguas residuales del resto de las corrientes diluyen la DQO hasta 48,1 g/L, valor promedio obtenido en el periodo entre 2017-2024 para diferentes meses (febrero, marzo, abril, mayo) por el laboratorio de la UDI-CEEPI de la Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez” (tabla 1).

**Tabla 1-** Caracterización físico-química de las vinazas de la destilería.

Parámetros	Unidad de Medida	UDI-CEEPI 2017-2024	Barrera et al. <sup>(6)</sup>	López González et al. <sup>(7)</sup>
DQO	g/L	48,1	65,2	62,3
ST	%MF	N.A.	5,6	5,3
SV	%ST	N.A.	76,7	78,6
Sólidos Sedimentables	mL/L	0,4	N.A.	N.A.
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1,9	3,24	N.A.
COT	g/kg	N.A.	24,7	21,7
NT	g/kg	N.A.	0,6	0,6
pH	-	4,4	4,8	4,8
PT	g/kg	N.A.	0,1	0,1
Sulfato	g/kg	N.A.	1,8	1,8
C:N ratio		N.A.	41:1	36:1

DQO: Demanda Química de Oxígeno, ST: Sólidos Totales, SV: Sólidos Volátiles, COT: Carbono Orgánico Total, NT: Nitrógeno Total, PT: Fósforo Total, N.A. NO analizado.

### Estimación del potencial de biogás

Para el estimado del potencial de biogás se utilizaron las ecuaciones 1 y 2. Se utilizó el rendimiento de metano por kg de DQO eliminada ( $y_{CH_4}$ ) de 0,342 m<sup>3</sup>/kg, reportado por <sup>(6)</sup>, para un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB, por sus siglas en inglés) utilizando vinaza de la propia destilería “Melanio Hernández”.

$$V_{CH_4} = Q_v * DQO * \left(\frac{Ef_{DQO}}{100}\right) * y_{CH_4} * 0,90 \quad (1)$$

$$V_{Biogás} = \frac{V_{CH_4}}{\% CH_4/100} \quad (2)$$

donde:

$V_{CH_4}$ : Volumen de metano (m<sup>3</sup>/día),

$Q_v$  es el flujo volumétrico de las vinazas (m<sup>3</sup>/día),

DQO es la Demanda Química de Oxígeno de las vinazas (kg DQO/m<sup>3</sup>), se utilizó un valor promedio reportado (63,5 kg/m<sup>3</sup>),

$Ef_o$  es la eficiencia de remoción de DQO (70 % de remoción),

$V_{\text{Biogás}}$  es la cantidad de biogás producido ( $\text{m}^3/\text{día}$ ), y

%  $\text{CH}_4$  es el contenido de metano en el biogás (60%).

### Alternativas para el uso del biogás

El consumo energético de la destilería está caracterizado por la presencia de diferentes portadores energéticos, de los cuales los más representativos son el fuel oil, utilizado en la generación de vapor de la caldera y la electricidad.

Para el estudio se compararon tres alternativas para el uso del biogás, dos consideran la sustitución de portadores energéticos en la destilería, y una dirigida a beneficiar la comunidad donde se localizaría la planta. Para las tres alternativas el lodo y el efluente líquido del biodigestor se utilizan como abono orgánico y fertirriego, respectivamente.

**Alternativa 1:** Generación de energía eléctrica y térmica con grupo electrógeno.

**Alternativa 2:** Generación de energía térmica en caldera.

**Alternativa 3:** Cocción de alimentos.

A continuación, se detallan las consideraciones utilizadas para realizar el balance energético en cada alternativa.

#### Alternativa 1. Producción de energía eléctrica y térmica

Para producir 700 hL/d de alcohol se necesitan 500 kWh/d de electricidad. En esta alternativa se consideró alimentar el biogás a un grupo electrógeno, con lo cual se obtiene energía eléctrica para ser utilizada en la planta, y si hay un excedente vender a la red. La energía térmica proveniente del enfriamiento de los motores (agua a  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ) se puede utilizar en el calentamiento del reactor, y la de los gases de escape ( $450\text{ }^\circ\text{C}$ ) en una caldera de recuperación para producir vapor a baja presión.

Para estimar la energía eléctrica y térmica generada a partir del biogás producido y la cantidad de biogás requerido para suplir las necesidades energéticas para la producción de alcohol se emplearon las ecuaciones 3-6.

$$EE = V_{\text{Biogás}} * VC_{\text{Biogás}} * \eta_e \quad (3)$$

$$ET = V_{\text{Biogás}} * VC_{\text{Biogás}} * \eta_t \quad (4)$$

$$EE_C = P_{Et} * IC_e \quad (5)$$

$$V_{\text{Biogás,EE}} = \frac{EE_C}{EE} * V_{\text{Biogás}} \quad (6)$$

donde:

EE es la Energía eléctrica generada (kWh/d),

ET la Energía térmica generada (kWh/d),

$V_{\text{Biogas}}$  es la cantidad de biogás producido a partir de las vinazas ( $\text{m}^3/\text{día}$ ),

$VC_{\text{Biogas}}$  el valor calorífico del biogás ( $6 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ),

$\eta_e$  es la eficiencia eléctrica de grupo electrógeno (%),

$\eta_t$  es la eficiencia térmica del grupo electrógeno (%),

$EE_C$  es la energía eléctrica consumida en la producción de alcohol (kWh/d),

$IC_e$  es el índice de consumo de electricidad por hL alcohol ( $22,53 \text{ kWh}/\text{hL}$ ),

$P_{\text{et}}$  es la producción de etanol ( $700 \text{ hL}/\text{d}$ ),

$V_{\text{Biogas,S}}$  la cantidad de biogás requerido para la generación de energía eléctrica ( $\text{m}^3/\text{año}$ ). Los valores de  $\eta_t$  y  $\eta_e$  están en función de la capacidad del motor instalado, para lo cual se consultaron catálogos de proveedores de motores a biogás. <sup>(8)</sup>

## Alternativa 2. Generación de energía térmica en caldera

El vapor es producido por una caldera pirotubular con una capacidad de 23 t/h de vapor saturado a una presión de 11 MPa, la cual consume fuel oil. La caldera da servicio a las producciones de alcohol A, C o D, aguardiente, así como en la recuperación de levadura y obtención de levadura torula. Se trabaja 24 horas al día.

Para determinar la cantidad de fuel oil y de biogás requeridos para suplir esta demanda de vapor se utilizaron las ecuaciones 7-9.

$$ET_C = Mv * H * Qv * 1000 * 0,000278 \quad (7)$$

$$M_{\text{fuel oil}} = \frac{ET_C}{PCI_{\text{fuel oil}} * 0,278} \quad (8)$$

$$V_{\text{biogas,ET}} = \frac{ET_C}{PCI_{\text{biogas}} * 0,000278} \quad (9)$$

donde:

$ET_C$  es la energía térmica consumida en la producción de alcohol (kWh/d),  $Mv$  es el vapor generado en la caldera (t/h),  $H$  son las horas de trabajo al día (h),  $Qv$  es la entalpía específica del vapor saturado ( $1961 \text{ kJ}/\text{kg}$ ),  $M_{\text{Fuel Oil}}$  es el consumo de fuel oil de la caldera (t/día),  $PCI_{\text{fuel oil}}$  es el poder calorífico inferior del fuel oil ( $46 \text{ 526 kJ}/\text{kg}$ ),  $PCI_{\text{biogas}}$  es el poder calorífico inferior del biogás ( $21$

604 kJ/m<sup>3</sup>) y  $V_{\text{Biogas,ET}}$  la cantidad de biogás requerido para la generación de vapor (m<sup>3</sup>/d).

### **Alternativa 3: Cocción de alimentos**

El uso del biogás como combustible doméstico destinado a la cocción de alimentos en las viviendas del batey del central, en la escuela y en los comedores, tanto del central azucarero como de la destilería, se consideró en esta alternativa. Para el cálculo se utilizó un índice de consumo de 1,70 m<sup>3</sup> biogás/ vivienda, valor publicado por <sup>(6)</sup> para redes de biogás, y 0,15 m<sup>3</sup> biogás/comensal para comedores.

En la comunidad cercana a las áreas de la empresa existen 1325 viviendas, también hay una escuela donde almuerzan 206 niños y el resto del personal. En el comedor del Central hay 465 comensales en el período de zafra (90 días) y 405 en el período de no zafra (180 días), mientras que en el comedor de la destilería hay 115 comensales. Se considera que solo se pueden cubrir 270 días con el servicio del biogás.

Para esta alternativa el portador energético que se ahorra es la electricidad. Se estima que se puede ahorrar 40-60% del consumo de electricidad de una vivienda, por lo que se utilizó un valor de 4 kWh/d. <sup>(9)</sup>

## **Resultados y su discusión**

### **Potencial de biogás**

El potencial de producción de metano y de biogás generado a partir de las vinazas de la destilería es de 15 324 m<sup>3</sup>/d y 25 539 m<sup>3</sup>/d, respectivamente, para un índice de 25 m<sup>3</sup> de biogás/m<sup>3</sup> vinazas (tabla 2). Este valor está en el rango reportado <sup>(10)</sup>, aunque superior al índice de 14 m<sup>3</sup> de biogás/m<sup>3</sup> vinazas, obtenido para vinazas de la destilería de “Heriberto Duquesne”, en Cuba. <sup>(11)</sup>

Un resumen de los resultados de los balances energéticos para las alternativas estudiadas se presenta en la tabla 2 y se explica en las subsecciones a continuación.

### **Alternativa 1. Generación de energía eléctrica y térmica**

En esta alternativa se asume la generación de energía eléctrica y térmica a partir del biogás producido. Se estima que pueden generarse 64 972 kWh/d de energía eléctrica con tres unidades de cogeneración de 1202 kW cada una (Marca Jenbacher JMC 416 GS-BL) con 18 horas de servicio diario. Se

abastecen los 500 kWh/d de energía eléctrica consumidos en la producción de alcohol y se consumen 11 237 kWh/d en la operación de la planta de biogás, de acuerdo a un índice de 0,44 kWh/m<sup>3</sup> biogás reportado por <sup>(11)</sup>. La energía eléctrica sobrante de 53 235 kWh/d se puede vender, lo que proveerá beneficios a la entidad (tabla 2).

Los gases de escape del grupo electrógeno (típicamente entre 460 °C – 550 °C) generan vapor entre 6-12 bar (600-1200 kPa), que puede utilizarse en algún proceso. También el agua caliente obtenida del sistema de enfriamiento del motor puede ser usada para bajos requerimientos térmicos del proceso, como el propio calentamiento del digestor para alcanzar la temperatura óptima de 35 °C en régimen mesofílico. <sup>(12)</sup>

### **Alternativa 2. Generación de energía térmica en caldera**

El consumo de vapor en el proceso de producción de alcohol es de 23 t/h (552 t/d). Por este concepto el consumo diario de fuel oil es de 23 t/d (6282 t/año = 6,4 millones L/año). Si se reemplazara el fuel oil por biogás se necesitarían 50 104 m<sup>3</sup>/d de biogás. De acuerdo a una producción de biogás estimada de 25 539 m<sup>3</sup>/d, se podría reemplazar parcialmente (51%) el fuel consumido para la generación de vapor en la caldera de la destilería (tabla 2). Se ahorrarían 12 t/d (3267 t/año= 3,3 millones L/año) de fuel oil.

La evaluación del uso del biogás como combustible en sistemas de generación de vapor es una práctica que permite optimizar el aprovechamiento de los desechos agroindustriales. La sustitución parcial o total del combustible fósil usado en la caldera por biogás disminuye el impacto ambiental ocasionado en la combustión del fuel oil, la quema del biogás no produce ceniza, ni SO<sub>2</sub> y la emisión de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) es mínima, solamente existe la emisión de CO<sub>2</sub>, tomando en cuenta que el biogás tiene características similares en cuanto al contenido de metano al gas natural.

### **Alternativa 3. Cocción de alimentos**

Se necesitarían 2166 m<sup>3</sup>/d para suplir las necesidades de combustible doméstico con biogás. El 91% de este consumo sería para las viviendas de la comunidad, mientras que los comedores de la empresa solo consumen un 7 % (tabla 2). Por tanto, existiría un sobrante de 23 373 m<sup>3</sup>/d de biogás. Por lo que la alternativa 3 debe analizarse en conjunto con las alternativas 1 (A3-A1) y 2 (A3-A2). Este análisis se presenta en la subsección a continuación.

**Tabla 2-** Resultados obtenidos para las diferentes alternativas

Potencial	Unidad	Valor
Producción de metano	m <sup>3</sup> /día	15 324
Producción de biogás	m <sup>3</sup> /día	25 539
Índice de biogás	m <sup>3</sup> biogás/m <sup>3</sup> vinaza	25
<b>Alternativa 1</b>		
Energía eléctrica consumida en el proceso	kWh/d	500
Energía eléctrica generada	kWh/d	64 972
Energía térmica recuperada	kWh/d	78 334
Potencia eléctrica	kW	3 x 1202
Tiempo de servicio diario	h	18
Eficiencia eléctrica ( $\eta_e$ )	%	42,4
Eficiencia térmica ( $\eta_t$ )	%	42,8
<b>Alternativa 2</b>		
Energía térmica consumida en el proceso	kWh/d	300 927
Consumo fuel oil	t/d	23,3
Cantidad de biogás requerido	m <sup>3</sup> /d	50 104
<b>Alternativa 3</b>		
Cantidad de biogás para viviendas y comedor de la escuela	m <sup>3</sup> /d	2018
Cantidad de biogás para comedores de la empresa	m <sup>3</sup> /d	148

Una comparación del ingreso obtenido y emisiones evitadas de CO<sub>2</sub>eq para las cuatro alternativas propuestas (A1, A2, A3-A1, A3-A2) es resumida en la tabla 3. El análisis se hizo en base al cálculo del ahorro anual del portador energético para la empresa, y su valor en pesos cubanos (CUP), y del ahorro en USD para el país a los precios del mercado internacional.

Entre las dos alternativas industriales para el uso del biogás producido a partir del tratamiento de vinazas de destilerías, la mejor solución desde el punto de vista económico es el empleo de esta fuente renovable para la generación de vapor, disminuyendo los costos de producción de la empresa por concepto de ahorro por la sustitución del fuel oil por biogás en un monto de 35,6 millones de CUP anuales.

Anualmente el consumo de fuel oil de la empresa puede llegar a los 6,4 millones de litros por año, por lo que un ahorro de 3,3 millones resultaría significativo para el país, al sustituir las importaciones de fuel oil por un valor de \$1159 MUSD al año. Otro aspecto importante es que la inversión para la caldera solo sería para la adquisición de un quemador dual fuel oil/biogás, cuyo precio se estima en \$385 000 USD, mientras que para la generación de electricidad se proponen 3 grupos electrógenos con una inversión de 1,7 millones de USD.

**Tabla 3-** Comparación de alternativas por ingreso y emisiones evitadas de CO<sub>2</sub>eq.

	Portador que se sustituye	Ahorro anual	%	Ahorro (MMCUP/año)	Ahorro (MUSD/año)	Emisiones evitadas (t CO <sub>2</sub> eq/año)
A1	Electricidad	500 kWh	100	1,3	1071,6	11 176,8
A2	Fuel oil	3267 t	51	35,6	1159,8	8,1
A3-A1	Electricidad	500 kWh	100	1,3	1190,1	12 418,1
A3-A2	Electricidad/ Fuel oil	2952 t	47	32,2	1167,1	1248,6

Precios en CUP <sup>(13)</sup>: Fuel oil: 10,69 CUP/L, Electricidad: 9,7626 CUP/kWh. Precios en USD e índices <sup>(14)</sup>: Fuel oil ponderado para calderas: 355 USD/t, Fuel oil ponderado para generación de electricidad: 292 USD/t, Factores de emisión CO<sub>2</sub>: 0,8674 t CO<sub>2</sub>eq/MWh, 0,002481869 t CO<sub>2</sub>/t fuel oil.

Este análisis se confirma con el cálculo de los indicadores económicos dinámicos Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación al Descuento (PRD). Para la red de biogás (Alternativa 3) se estimó una inversión de \$418 063,75 USD, de acuerdo a datos reportados. <sup>(15)</sup>. Como se observa en la tabla 4 la alternativa A1 no fue factible económicamente, ni considerando en los ingresos la venta de bonos de Carbono en el mercado voluntario a un precio de 8 USD/t (A1-CO<sub>2</sub>), aunque un mejor valor lo ofrece el mercado regulado con 59,64 USD/t. <sup>(16)</sup>

**Tabla 4-** Indicadores dinámicos de la inversión para las alternativas.

	VAN	TIR	PRD
A1	-\$1 325 194,39	7%	>15 años
A1-CO <sub>2</sub>	-\$617 632,33	10%	>15 años
A2	\$1 079 020,57	19%	7,0 años
A2-CO <sub>2</sub>	\$1 786 582,63	23%	5,6 años
A2-A3	\$961 038,96	17%	9,1 años
A2-A3- CO <sub>2</sub>	\$1 668 601,02	20%	7,0 años

Tasa de interés: 12%. Vida útil: 15 años.

La alternativa A2 fue factible económicamente con valores del VAN>0, TIR>12 % y PRD de 7 años (sin venta de bonos de CO<sub>2</sub>, A2), y de 5,6 años cuando se considera la venta de bonos de CO<sub>2</sub> (A2-CO<sub>2</sub>). La combinación de A2-A3 fue factible económicamente, pero con un PRD superior a A2.

En la combinación A2-A3 se logra reemplazar el 47% del consumo de fuel oil, con beneficios similares en ahorro en CUP y USD que la A2, pero además podría mejorar la calidad de vida de la comunidad donde se encuentra la empresa, por lo que tiene un beneficio social que debe ser considerado al tomar una decisión. Desde el punto de vista ambiental el uso del biogás para la

generación de electricidad es la variante con mayor reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> con 11 176 t CO<sub>2</sub>eq al año.

## Conclusiones

- 1- Se estimó una producción de biogás partir de la digestión anaerobia de vinazas de la destilería “Melanio Hernández” de 25 539 m<sup>3</sup>/d. Esto demuestra el alto potencial de este residual que pudiera ser valorizado con fines energéticos integrado a la producción de alcohol.
- 2- El biogás producido puede utilizarse para reemplazar un 51% del fuel oil consumido en la generación de vapor, o suplir 500 kWh/d de electricidad del proceso de producción de alcohol y vender 47 724 kWh/d al sistema electroenergético nacional. También se puede beneficiar a la comunidad y comedores de la empresa con el uso del biogás en la cocción de alimentos.
- 3- La aplicación del biogás para reemplazar el fuel oil en la caldera de la destilería es la alternativa más atractiva desde el punto de vista económico con un beneficio anual valorado en 35,6 millones CUP para la empresa y de \$1,16 millones USD para el país por fuel oil dejado de importar, VAN>0, TIR>12 % y PRD de 5,6 años cuando se considera la venta de bonos de Carbono.
- 4- La digestión anaerobia de las vinazas de la producción de etanol puede reducir el consumo de los principales portadores energéticos, a la vez que se reduce su alta carga contaminante.

## Referencias bibliográficas

1. OLIVA MERENCIO, D. y PEREDA REYES, I. Biogás y sostenibilidad en Cuba. *Universidad y Sociedad*, 2022, **14** (2), 597-609. ISSN 2218-3620.
2. IRENA. *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Pathway*, Volume 1, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [Consultado 12 de abril de 2023]. Disponible en: [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications).
3. PARTIDO COMUNISTA DE CUBA. Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución para el período 2021-2026. La Habana: PCC, 2021. [Consultado 17 de enero de 2024]. Disponible en: <https://bit.ly/2UHo80k>.

4. DE CARVALHO, J.C., DE SOUZA VANDENBERGHE, L.P., SYDNEY, E.B.; KARP, S.G., MAGALHÃES, A.I., JR.; MARTINEZ-BURGOS, W.J.; MEDEIROS, A.B.P., THOMAZ-SOCCOL, V., VIEIRA, S., LETTI, L.A.J. Biomethane Production from Sugarcane Vinasse in a Circular Economy: Developments and Innovations. *Fermentation*, 2023, **9** (4), 349. DOI: 10.3390/fermentation9040349.
5. DA SILVA M. A. S., N.P. GRIEBELER, L.C. BORGES, Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2007, **11**(1), 108-114. ISSN: 1807-1929. DOI: 10.1590/S1415-43662007000100014.
6. BARRERA, E.L., SPANJERS, H., ROMERO, O., ROSA, E., DEWULF, J. Characterization of the sulfate reduction process in the anaerobic digestion of a very high strength and sulfate rich vinasse. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 248, 383–393. ISSN: 1385-8947. DOI: 10.1016/j.cej.2014.03.057
7. LÓPEZ GONZÁLEZ, L.M, PEREDA REYES, I., ROMERO ROMERO, O. Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. *Waste Management*, 2017, **68**, 139-145. ISSN: 0956-053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.016.
8. Zorg-biogas *Catálogo-de-equipos/generadores/generador-de-biogás*. [Consultado 1 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://zorg-biogas.com>.
9. LÓPEZ-SAVRAN, A., & SUÁREZ-HERNÁNDEZ, J. Experiencia de suministro de biogás en una comunidad rural, en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 2018, **41**(1), 73-79. ISSN: 2078-8452. [Consultado 17 de enero de 2024]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-3942018000100010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-3942018000100010&lng=es&tlng=es).
10. PARSAEE M., KIANI DEH KIANI, M., KARIMI K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*, 2019, **122**, 117-125. ISSN 0961-9534. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.01.034.
11. OBAYA, M.C., VALDÉS, E., VALENCIA, R., LEÓN, O.L., MORALES, M., PÉREZ, O., DÍAZ, S., VALDIVIA, O., ROJAS MARTINEZ, G. Tratamiento combinado de las vinazas de destilería y residuales azucareros en reactores UASB. *Tecnología del agua*, 2004, **249**, 78-85. ISSN 0211-8173. [Consultado 13 septiembre 2021]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=922906>.

12. GIZ. 2013. *Guía sobre el Biogás. Desde la producción hasta el uso*. 5<sup>ta</sup> Ed. Alemania: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2013, pp. 246. [Consultado 18 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>.
13. UEB MELANIO HERNÁNDEZ. 2024. Tarifa de precios de productos. Contabilidad y finanzas. Documento interno de la Unidad Empresarial Básica “Melanio Hernández”.
14. TRINCADO PACHECO, J.E. Factores de conversión, equivalencias y datos para cálculos de potenciales de ahorro. Documento interno de la Dirección de Normalización y evaluación energética de Cuba. Enero, 2024.
15. ALBA-REYES, Y., HERMIDA-GARCÍA F.O, PEDRAZA-GARCIGA, J., LÓPEZ-GONZÁLEZ, L.M, ESPINOSA-NEGRÍN, A. M., CARBONELL-SORÍ L., BARRERA, E.L. Economic and environmental assessment of a biogas-based pressurized grid in a livestock farm: A case study in a cuban context. *Journal of Cleaner Production*, 2024, **434**, 140288. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140288.
16. SENDECO2. Sistema europeo de negociación de CO<sub>2</sub>. [Consultado 12 de febrero de 2024]. Disponible en: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>.

## **Conflicto de Interés**

Los autores declaran que no hay conflictos de interés

## **Contribución de los autores**

Maura Irene Pérez-Sosa: redacción borrador original.

Lisbet Mailin López-González: conceptualización, supervisión y revisión.

Julio Pedraza-Garciga: revisión y edición.

Ernesto Luis Barrera-Cardoso: revisión y edición.