



Maestría en Producciones Más Limpias

“Propuesta de una planta de biogás para el tratamiento de vinazas en la destilería Melanio Hernández”

Proposal for a biogas plant for vinasses treatment at Melanio Hernandez distillery.

Autora: Maura Irene Pérez Sosa

Tutores: Dr. C. Lisbet Mailín López González

Dr. C. Ernesto Luis Barrera Cardoso

Sancti Spíritus
2024

Copyright©UNISS

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, y se encuentra depositado en los fondos del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación “Raúl Ferrer Pérez” subordinada a la Dirección de General de Desarrollo 3 de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su publicación bajo la licencia siguiente:

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación “Raúl Ferrer Pérez”.

Comandante Manuel Fajardo s/n, Olivos 1. Sancti Spíritus. Cuba. CP. 60100

Teléfono: 41-334968

***“Sólo cabe progresar cuando se piensa en grande, sólo
es posible avanzar cuando se mira lejos”.***

José Ortega y Gasset

Dedicatoria

- A mis padres por acompañarme en cada paso de este complejo camino.

Agradecimientos

- A mi familia, por estar siempre a mi lado.
- A mi Santa Cecilia (Lisbeth) y Ernesto mis tutores, por estar siempre brindándome sus conocimientos y sobre todo ese amor y dedicación.
- A los amigos del CEEPI que adquirí en esta etapa, por toda la ayuda que me ofrecieron.
- A mis compañeros de trabajo por alentarme siempre a cumplir esta meta.
- A mi AMA y APA por nunca dejarme caer y siempre apoyarme y facilitarme el camino.
- A los profesores de la maestría por todas las experiencias brindadas.
- A mi Winie Pooh por llegar en el momento que más lo necesitaba y hacerme muy feliz.
- A todos los que de una forma u otra hicieron posible que lo logre muchas gracias.

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 29 299 m³/d, correspondiente a un índice de 19 m³ de biogás/m³ de vinazas. El reemplazo del consumo de fuel en la caldera de la destilería por biogás fue la alternativa con mayor ingreso anual para la empresa, valorado en 40,8 millones CUP, sin embargo, para el país se obtiene un mayor ingreso (1159,8 mil USD) cuando se combina la alternativa anterior con la electricidad ahorrada en la cocción de alimentos. Los indicadores dinámicos de la inversión fueron mejores para la alternativa de sustitución de fuel oil por biogás, con VAN>0, TIR>12% y PRD de 5,6 años. En cuanto al análisis ambiental la alternativa con mayor reducción en las emisiones de CO₂ fue la que considera el reemplazo de la electricidad por biogás. La digestión anaerobia de las vinazas de la producción de etanol a partir de miel de caña de azúcar 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 claves: biogás; electricidad; fuel oil; generación de vapor; vinaza.

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, in the province of Sancti Spíritus, 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 29 299 m³/d was obtained, corresponding to an index of 19 m³ of biogas/m³ of vinasses. The replacement of fuel consumption in distillery boiler with biogas was the alternative with the highest annual income for the company, with a value of 40,8 million CUP, however, for the country a greater income is obtained (1 159.8 thousand USD) when the previous alternative is combined 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>0, TIR>12% and PRD of 5,6 years. Regarding the environmental analysis, the alternative with the greatest reduction in CO₂ emissions was the one that considers the replacement of electricity with biogas. The anaerobic digestion of vinasses from the production of ethanol from sugar cane can reduce the consumption of fuel oil and electricity in the alcohol production process, while reducing its high pollution load.

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

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 Aguas residuales de la industria azucarera.....	5
1.1.1 Aguas residuales del proceso de producción de alcohol	6
1.2 Vinazas de destilería.....	8
1.3 Efecto ambiental de las vinazas de la destilería de alcohol	11
1.4 Tratamiento y/o usos de las vinazas de la destilería de alcohol.....	12
1.5 Digestión anaerobia como proceso biológico.....	16
1.5.1 Etapas metabólicas de la digestión anaerobia.....	18
1.5.2 Parámetros ambientales y de control.....	21
1.6 Tecnologías para el tratamiento anaerobio de las vinazas	23
1.6.1 Lagunas tapadas	25
1.6.2 Filtros anaerobios	25
1.6.3 Reactor UASB.....	26
1.7 Efluentes de la digestión anaerobia	26
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.1 Descripción del proceso tecnológico de la producción de alcohol	29
2.1.1 Procedencia y caracterización del residual de la destilería.....	31
2.1.2 Balance de agua y de aguas residuales	31
2.2 Bases para el diseño de la planta de biogás.....	35
2.2.1 Descripción de la tecnología de producción de biogás	35
2.2.2 Diseño del equipamiento.....	37
2.3 Alternativas para el uso del biogás.....	43
2.3.1 Análisis energético.....	43
2.3.2 Análisis económico	46
2.3.3 Análisis ambiental	48
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
3.1 Diseño de la planta de biogás	54
3.1.1 Caracterización físico-química de las vinazas de la destilería	54
3.2 Dimensionamiento del equipamiento	56
3.3 Alternativas para el uso del biogás.....	63
3.4 Evaluación económica y análisis de alternativas	66
3.5 Evaluación ambiental de la planta de biogás	70
CONCLUSIONES.....	74

RECOMENDACIONES 75

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 (Oliva Merencio & Pereda Reyes, 2022). Por tanto, la transición energética hacia energías renovables y limpias constituye un compromiso mundial. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2023) 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.

Los procesos de transición energética se han concentrado hasta ahora en la matriz de generación eléctrica, sin embargo, considerando que la electricidad representa en la actualidad alrededor de un 20 % del consumo final de energía y que más del 60 % de este consumo corresponde a fuentes de energía de origen fósil, es prioritario invertir mayores esfuerzos en la descarbonización de los sectores de consumo final, sobre todo en los más intensivos en el uso de energía como son el transporte y la industria, así como los impactos ambientales que provocan una incidencia directa en la población, ya sea por la emisión de partículas, gases contaminantes y residuales sólidos o líquidos que dificultan el saneamiento ambiental de los ecosistemas (CUBAENERGÍA, 2021).

La necesidad de potenciar el aprovechamiento de las distintas Fuentes Renovables de Energía (da Silva et al., 2021), es un camino impostergable para Cuba y está incluido en los Lineamientos del Partido Comunista de Cuba (PCC, 2021). 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.

El biogás se obtiene como subproducto de la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Es una mezcla de gases compuesta principalmente por

metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). La presencia del metano lo convierte en un combinado de alto valor energético. Su empleo no solo aprovecha el valor de una fuente renovable de energía, sino que contribuye a disminuir la emisión de un gas de efecto invernadero 21 veces superior al CO_2 , en este caso el CH_4 y pequeñas trazas de óxido nitroso (NO_x), cuyo efecto invernadero supera en tres centenas (310) el del gas de comparación internacional, CO_2 (CUBAENERGÍA, 2021).

Dentro de los sustratos con mayor potencialidad en el país para la producción de biogás están las vinazas generadas en las destilerías de alcohol, obtenido a partir de miel final de caña de azúcar como materia prima, la cual se produce en volúmenes variables de 9-15 L de vinaza. L^{-1} de etanol (Ospina León et al., 2023). Sus características dependen en gran medida de la materia prima y de las condiciones operacionales aplicadas en las etapas de fermentación y destilación (España-Gamboa et al., 2011), la riqueza de azúcares en la miel y la calidad del mosto fermentado (Montiel-Rosales et al., 2022). Este es un residuo de composición compleja, con un pH ácido, alta Demanda Química de Oxígeno (DQO) ($46\text{-}65 \text{ kg/m}^3$), color oscuro por la presencia de melanoidinas, alto contenido de potasio, así como de fósforo, calcio y nitrógeno.

Una incorrecta aplicación de vinaza puede afectar el suelo, el agua y el aire. 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). En el suelo modifica el pH y la conductividad provocando toxicidad al ambiente donde se vierte (da Silva et al., 2021), aproximadamente 100 veces más que las aguas residuales domésticas (Bergmann et al., 2018). Además, incrementa el contenido de potasio debido al alto riesgo de eutrofización en el suelo a niveles tóxicos, así como de metales pesados con efectos carcinogénicos (De Carvalho et al., 2023).

En Cuba la disposición de vinazas, directa e indirectamente a cuerpos de agua es prohibida. 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 utilizándola como fertilizante líquido, reduciendo el aporte de agua

para el crecimiento de las plantas; sin embargo, esta técnica puede tener impactos negativos, causando la lixiviación de iones a cuerpos de agua subterránea, contaminando aguas superficiales y suelo (Da Silva et al., 2007). 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.

Se han identificado y utilizado algunos usos adecuados para el manejo de las vinazas en operaciones a gran escala, como la recirculación de las vinazas a la etapa de fermentación, producción de energía y producción de alimentos para animales. Además, también se han llevado a cabo iniciativas para transformar la vinaza en una materia prima de alto valor añadido a través de la digestión anaerobia para la obtención de biogás (Reis & Hu, 2017).

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 este residuo.

La Empresa Agroindustrial Azucarera “Melanio Hernández” es un complejo azucarero con destilería anexa, con una molienda potencial de 4600 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, 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. El tratamiento de las vinazas de la producción de alcohol es actualmente en lagunas de oxidación con una disposición final en el fertirriego. El sistema de fertirriego cuenta con 400 hectáreas bajo riego por bombeo, y 110 hectáreas que se riegan por pipas que transportan la vinaza. Esta situación trae consigo el excesivo riego con vinaza

en las mismas áreas, además de las emisiones de GEI en las lagunas y afectaciones por contaminación del río Tuinucú por llenado. En este contexto se define como:

Problema Científico: En la destilería Melanio Hernández no se dispone de una solución integrada y energéticamente eficiente para la reducción de los efectos negativos al medio ambiente que provocan las vinazas en el proceso de producción de alcohol, por lo que el alcance actual del tratamiento y disposición final es limitado.

Hipótesis: Si se tratan las vinazas de la destilería Melanio Hernández por digestión anaerobia, se obtendrá una solución integrada y energéticamente eficiente para la reducción de los efectos negativos al medio ambiente que provoca su disposición actual.

Objetivo General: Proponer una alternativa técnica, económica y ambientalmente factible para el tratamiento anaerobio de las vinazas en la destilería Melanio Hernández.

Objetivos Específicos:

1. Diseñar una planta para la producción de biogás a partir de las vinazas integrada a la producción de alcohol en la destilería Melanio Hernández.
2. Comparar diferentes escenarios para el uso del biogás y el lodo fertilizante con un enfoque de economía circular.
3. Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la planta de biogás a partir de las vinazas integrada a la producción de alcohol en la destilería Melanio Hernández.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se tratan temas sobre el proceso de producción de biogás mediante la digestión anaerobia de las vinazas de destilería. Se analiza la situación energética mundial y de Cuba, así como la disposición de las aguas residuales en el proceso de producción de alcohol. Se abordan los impactos ambientales, usos y tratamientos de las vinazas. Se presenta un análisis de las tecnologías existentes para llevar a cabo la digestión anaerobia, así como los efluentes que se generan en este proceso. Finalmente, se abordan los elementos esenciales para realizar la evaluación técnica, económica y ambiental de la planta de biogás empleando como sustrato las vinazas generadas en el proceso de producción de alcohol.

1.1 Aguas residuales de la industria azucarera

El agua es un recurso imprescindible para la vida de todos los seres vivos, en especial para el hombre, que la emplea en múltiples actividades que garantizan la supervivencia y el desarrollo de su existencia. El agua empleada para consumo industrial no siempre ha sido usada de forma racional y esto ha provocado, en los últimos años, un aumento considerable de los volúmenes de residuales, que atentan contra la disponibilidad del recurso hídrico y el equilibrio natural de los ecosistemas (Fuentes-Cruz et al., 2023).

En Cuba, la industria azucarera es una de las mayores consumidoras de agua, además de ser una fuente importante de contaminación orgánica, situación que la convierte en una alta generadora de aguas residuales al medioambiente, pues la carga contaminante de sus fábricas representa aproximadamente del 80 % del total que aportan las industrias (Orduña-Gaytán, 2020 #252).

En teoría la caña de azúcar (materia prima) podría aportar agua suficiente para todos los procesos industriales del ingenio, puesto que el agua alcanza proporciones del 70 % del peso de la caña de azúcar. Sin embargo, la industria azucarera se encuentra entre las industrias con mayor demanda de agua ya que depende, en alto grado, de un abastecimiento adecuado, como componente de productos, en el control del proceso de producción; así como en el enfriamiento de máquinas que generan calor o en la limpieza de determinadas operaciones y

partes del proceso productivo. En los últimos años el consumo de agua ha aumentado a razón de 1 a 1.5 % por año, utilizando aproximadamente, entre 1500 y 2000 L de agua por tonelada de caña de azúcar procesada y generando alrededor de 1 000 L de agua residual (Montiel-Rosales et al., 2022). Entre los factores que motivan un consumo de agua adicional en este proceso se pueden valorar razones de origen operativo como las frecuentes paradas en el proceso; el despilfarro incontrolado en labores de limpieza y enfriamiento y otras de origen tecnológico (Fuentes-Cruz et al., 2023).

El tratamiento de los residuales de la industria azucarera y de sus plantas de derivados reviste gran importancia ya que, por una parte, estos residuales o efluentes podrían considerarse como materias primas en producciones de gran valor, tales como: biogás y los lodos fertilizantes o aplicados directamente, como componentes de dietas de nutrición animal y para la fertilización o enmienda orgánica de los suelos, además del ahorro de agua que lleva implícito. Por otra parte, eliminar la contaminación que ocasiona, sirve de apoyo adicional a la investigación y al estudio de las diferentes opciones para el tratamiento y aprovechamiento más eficaz de los efluentes de esta industria (Fuentes-Cruz et al., 2023)

1.1.1 Aguas residuales del proceso de producción de alcohol

Un elemento residual de gran potencialidad dentro de la industria azucarera-alcoholera lo constituyen las aguas residuales generadas en el proceso de producción de alcohol las cuales poseen un alto impacto sobre el medioambiente, tanto por el volumen que se generan (10-18 veces el volumen de alcohol producido) (Mamani et al., 2021), como por la composición orgánica e inorgánica de los mismos (Parsaee et al., 2019).

La principal corriente de agua residual de una destilería se obtiene en el proceso de destilación de la fermentación de mieles para la producción de alcohol. Por cada hectolitro de alcohol producido, se generan de 1,6 a 1,8 m³ de vinaza o agua residual. Otros residuales líquidos del proceso productivo son el agua de lavado de los fermentadores, aguas de enfriamiento de condensadores y aguas de limpieza de los equipos, los cuales representan entre 2,5 - 5% del volumen

de las aguas residuales producidas en la destilación (Salazar Rodríguez, 2013). Las características y cantidades de las aguas residuales generadas en las diversas etapas del proceso de fabricación de alcohol se proporcionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las corrientes de aguas residuales generadas en una destilería

Parámetros	Índice de generación (L/L de alcohol)	pH	Sólidos Totales (g/L)	Sólidos Suspendedos (g/L)	DBO (g/L)	DQO (g/L)
Agua de lavado	11,9-14,4	4-4,6	100	0,615-0,1	45-60	8-120
Limpieza de fermentación	0,6-1,6	3,5-5,5	1-1,3	0,4-0,6	0,5-4	1,2-16,5
Enfriamiento en fermentación	0,4-2,0	6,26-6,3	1-1,5	0,220	0,1-0,11	0,5-1,0
Enfriamiento en condensador	2,88-7,9	6,8-9,2	0,7-0,9	0,18-0,4	0,045-0,08	0,2-0,425
Limpieza de pisos	0,5-0,8	6-7,3		0,175-0,3	0,015-0,1	0,025-0,20
Otros	0,8-1,3	8,1		0,100	0,030	0,250

Fuente: Adaptado de (Khot, 2021; Satyawali, 2008)

En general, las vinazas de destilería y el agua para el enfriamiento del sistema son los principales contribuyentes al volumen total de aguas residuales producidas en etapas particulares de la producción de alcohol.

El volumen de vinazas depende de varios factores, entre los que cabe destacar el tipo de tecnología empleada para la obtención de etanol, la utilización o no de rehervidores en las columnas, el grado alcohólico del vino, influenciado por la eficiencia en fermentación, la recuperación o no de levadura y el tipo de materia prima empleada, entre otros (Rodríguez-Suárez et al., 2023)

Debido a la generación de una gran cantidad de aguas residuales con cargas orgánicas muy altas, las destilerías son unidades que consumen mucha agua. Los costes medioambientales y económicos pueden optimizarse mediante una gestión racional de este efluente. Por lo tanto, según los principios de una bioeconomía, las vinazas de destilería deberían transformarse en productos valiosos como calor, energía y otros bioproductos, como el compost. Por todas estas razones, no sólo es importante purificar las aguas residuales de las destilerías sino también utilizarlas como materia prima para la producción de productos de valor añadido (Zielińska et al., 2021).

1.2 Vinazas de destilería

Las vinazas es uno de los residuales orgánicos de la industria azucarera de mayor efecto contaminante sobre la flora y fauna, cuando su disposición final es inadecuada (Ibarra-Camacho et al., 2019). Estos desechos pueden convertirse en subproductos con cierto valor económico y a la vez, evitar el impacto al medio ambiente. Minimizar los volúmenes y la agresividad de estos residuales podría ser el primer paso.

El tipo de vinaza depende directamente del proceso de obtención de alcohol y del tratamiento que se realice para separar el alcohol de la melaza ya fermentada. Este residuo proveniente de la destilería, puede variar de acuerdo con la materia prima utilizada para la fermentación y pueden ser almidones, cereales, melazas, jugo de caña, en fin, productos que contengan unidades de glucosa, de ahí la importancia de su caracterización. Algunos estudios realizados han demostrado que presenta en su composición química altos contenidos de materia orgánica, potasio y calcio, así como cantidades moderadas de nitrógeno y fósforo (España-Gamboa et al., 2011). Cuando el alcohol se elabora a partir de la melaza se genera vinaza con mayores contenidos de materia orgánica, que

cuando procede de jugo o de la mezcla de jugo y melaza (Ibarra-Camacho et al., 2019).

Las vinazas están caracterizadas por un alto contenido de DQO y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) debido a la presencia de una serie de compuestos orgánicos como polisacáridos, proteínas, polifenoles, ceras y melanoidinas. La vinaza de caña de azúcar tiene color marrón oscuro (Parsaee et al., 2019). Los pigmentos de color oscuro se derivan de los compuestos fenólicos (ácidos tánico y húmico), melanoidinas, caramelos y furfurales que tiñen la vinaza y afectan negativamente el crecimiento de microorganismos que están presentes en los procesos de tratamiento de aguas residuales (Mikucka & Zielińska, 2020; Rustiana et al., 2021). La disminución en el pH de las vinazas puede estar influenciado por la contaminación en la etapa de fermentación debido a las bacterias formadoras de ácidos (Barrera et al., 2013). La vinaza tiene entre 93% y 97% de agua, 5% de materia orgánica (azúcares y carbohidratos) y 2% de sólidos inorgánicos insolubles (Parsaee et al., 2019; Pazuch et al., 2017). Es fuertemente soluble en agua (Roudbali et al., 2015; Rustiana et al., 2021). También tiene altos niveles de nutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio, además de sulfato y hierro. En la tabla 2 se presentan algunas propiedades físicas y químicas de las vinazas generadas en la etapa de destilación de la producción de alcohol de acuerdo a varios autores.

La vinaza tiene densidad, viscosidad, conductividad, punto de ebullición, capacidad calorífica específica y valor térmico de 1,031 kg/L, 0,00138 PaS, 16,4 dS/m, 100,25 °C, 0,934 cal/g. °C y 3,39 cal/g, respectivamente (González Rodríguez et al., 2020; Parsaee et al., 2019).

Tabla 2. Características físicas y químicas reportadas por varios autores

Características	Unidad	(Mikucka & Zielińska, 2020)	(Ibarra-Camacho et al., 2019)	(González Rodríguez et al., 2020)	(Rustiana et al., 2021)

pH	-	4.0 - 4.5	3.95 - 4.35	4.4	3 - 5
Temperatura	°C	71- 81	98.3-98.5	82	40 - 50
Color	-	Marrón oscuro			
ST	g/L	59 - 82	43 - 47	30	27-81
SV	g/L	38-66		38	
STS	g/L	2.4-5.0	33-41		7200
DQO	g/L	100 -150	52 - 54	60	32 -353.8
DBO	g/L	35 - 50		24	23 - 109
Nitrógeno	g/L	1.7 – 4.2		0.810	
Fósforo	g/L	0.225 – 0.308		0.190	0.001
Potasio	g/L	9.6 -15			
Hierro	g/L	1.6 – 1.8			0.2-0.488
Sulfatos	g/L	2.1-2.3		2.600	
Calcio	g/L	2.3-2.5		0.500	
Magnesio	g/L	0.22-0.25			

ST: Sólidos Totales; SV: Sólidos Volátiles; STS: Sólidos Suspendidos Totales

El contenido de sólidos totales de la vinaza depende de los volúmenes en que son generadas con respecto al etanol producido. Si la vinaza es recirculada a los fermentadores o si es concentrada, el contenido de sólidos totales aumenta y disminuye la relación (L vinaza/ L etanol) (Gil, 2012).

1.3 Efecto ambiental de las vinazas de la destilería de alcohol

Las plantas de producción de bioetanol son una de las 17 industrias con contaminación grave. La disposición de las vinazas en el medio ambiente es peligrosa y tiene un alto potencial contaminante porque pueden impactar las diferentes matrices ambientales (suelo, agua y aire) (De Carvalho et al., 2023).

La aplicación excesiva de vinaza daña la composición del suelo y su población microbiana, reduciendo hasta 90% del oxígeno disuelto en el suelo (Fuess et al., 2018). La aplicación repetida al suelo puede aumentar el contenido de metales pesados provocando un aumento de la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos, además de una disminución en la germinación de las plantas (efecto negativo sobre la actividad microbiana). Provoca toxicidad potencial para animales y humanos: cantidades excesivas de Cd, Cr y Ni son cancerígenos, mientras que el Pb, Cu y Zn pueden afectar el sistema nervioso central, así como el sistema gastrointestinal.

Si se aplica incorrectamente al suelo o se almacena en lagunas, la vinaza también puede ser una fuente de gases de efecto invernadero provenientes de la descomposición de la materia orgánica, principalmente CH₄, N₂O y CO₂ de los cuales el 99,8% pertenece a metano (Guarenghi et al., 2023; Oliveira et al., 2013; Ungureanu et al., 2022). Estos gases debido a los cambios en las propiedades físicoquímicas de las sustancias causan varios problemas, además del calentamiento global.

La vinaza también puede contaminar los cuerpos de agua y los ecosistemas marinos debido al alto contenido de DQO, acidez, nitrógeno y fósforo total del efluente que provocan la eutrofización de cuerpos de agua naturales. El residuo provoca el agotamiento del oxígeno disuelto en el agua y cambia su pH (Reis et al., 2019).

Los compuestos coloreados de vinaza reducen la penetración de la luz solar en ríos y lagos, reduciendo así la actividad fotosintética y la concentración de oxígeno disuelto en el agua (debido a la alta temperatura de la vinaza) conduce a la creación de condiciones peligrosas para la vida acuática (Prasad & Shih,

2016) y la perturbación de la vida de plantas y animales acuáticos debido a la fotosíntesis reducida (Syaichurrozi, 2016).

Este residuo es unas 100 veces más contaminante que las aguas residuales domésticas. La tasa de liberación de metano a cielo abierto en canales que transportan vinaza es igual a $1,36 \text{ kg CO}_2\text{eq m}^{-3}$, que es 620 veces mayor que en reservorios o ambientes cerrados (Formann et al., 2020). Lo anterior se debe al hecho de que no se puede fermentar fácilmente en depósitos cerrados. La eliminación de las vinazas debe realizarse fuera de las zonas pobladas debido a la contaminación y olor fuerte resultante de su descomposición. La vinaza tiene un olor desagradable para los humanos y su influencia en la contaminación del agua provoca brotes de malaria, amebiasis y esquistosomiasis. La contaminación de cada litro de vinaza es igual a la cantidad de contaminación producida por 1,43 humanos (Parsaee et al., 2019).

Debido a lo anterior, al descargar vinazas de alcohol al suelo, cuerpos de agua, canales, etc. sin un tratamiento previo se contaminará en gran medida las fuentes de aguas superficiales y subterráneas, así como también los mantos freáticos, lo que resultará en una gran alteración al medio ambiente, que repercutirá en los seres vivos.

1.4 Tratamiento y/o usos de las vinazas de la destilería de alcohol

La vinaza se utiliza en las industrias químicas para producir compuestos químicos como ácidos orgánicos, tensioactivos con *Bacillus subtilis* y aminoácidos. Otras de las aplicaciones de vinaza incluyen la producción de cultivo hidropónico, proteína y compost material como combustible con un valor térmico de 12 560-15 070 kJ/kg. Se utiliza en la construcción civil y en la alimentación del ganado y las aves (debido al alto contenido de nutrientes), y como materias primas para la producción de lípidos por bacterias y hongos. También se puede utilizar para producir, proteína y acetato de calcio y magnesio para la producción de diversos bioproductos (incluidos enzimas, quitosano, astaxantina, hormonas vegetales, biopolímeros, alternano, pululano), producción de algas (por ejemplo, *Chlorella vulgaris* y *Neochloris oleoabundans*) y

producción de levadura (que requiere alta energía y la adición de amonio y magnesio) (Parsaee et al., 2019).

Las prácticas que mayormente se utilizan en la gestión de las vinazas en las destilerías son el fertirriego, el biocompostaje y la incineración. El fertirriego implica el uso en el suelo, y se está convirtiendo en una técnica común debido a su bajo costo, aplicación rápida y aparente beneficio. En Cuba, los usos más frecuentes son como fertilizante “in natura” y riego, luego de un tratamiento por lagunas o diluido con agua de pozo u otro residual menos agresivo (González, 1999). Esta práctica para la agricultura puede ser un método viable de eliminación, y puede mantener la productividad en las zonas que se enfrentan a una disponibilidad limitada de agua. Además, el uso de vinazas puede reducir la aplicación de fertilizantes teniendo en cuenta el aporte de nutrientes y materia orgánica biodegradable mediante fertirrigación (Fuess et al., 2021). Sin embargo, la eliminación inadecuada de la vinaza puede ser peligrosa para los suelos y la vegetación debido a la presencia de sustancias tóxicas (Ospina León et al., 2023).

La condensación por evaporación es otra alternativa importante para el uso de tales residuos mediante el aprovechamiento de su poder calorífico para la generación de energía térmica y eléctrica. Con esta tecnología se obtienen cenizas potásicas comercializables como fertilizante, la generación de energía y la reducción de los residuales, aspecto que la convierte en una tecnología limpia. En esta técnica, la vinaza se puede quemar en calderas para generar energía, y el condensado removido por la evaporación puede ser tratado y reutilizado en la fábrica. Además, el producto obtenido como resultado de este proceso puede utilizarse para preparar la alimentación animal. Sin embargo, esta tecnología está asociada con muchos problemas, incluyendo la rápida incrustación de evaporadores, procesamiento intensivo en energía, cristalización espontánea y demandas de energía más altas en la etapa de evaporación, lo que lo convierte en un procedimiento muy costoso (Cruz Llerena et al., 2021).

Actualmente en Cuba, específicamente en la destilería Melanio Hernández, la forma más generalizada para el tratamiento de las vinazas es en lagunas de

oxidación, luego de lo cual es usada para el fertirriego de suelos cultivados con caña de azúcar. Las lagunas de oxidación son sistemas de tratamiento biológico de residuales líquidos con estructura muy simple, en las que se llevan a cabo procesos de depuración natural altamente eficientes y muy complejos, con un bajo consumo de energía (Fuentes-Cruz et al., 2023). Las ventajas de este sistema de tratamiento para países como Cuba, subdesarrollados y con las condiciones climáticas idóneas son: facilidad de construcción y operación, inversión de poco capital, bajos costos de operación, simplicidad en la operación y mantenimiento con los cuales ningún sistema puede competir, necesitan poco o ningún componente importado, constante disponibilidad de tratamiento, y la no necesidad de energía externa diferente a la solar (Botero et al., 2002).

En la industria azucarera los efluentes líquidos del proceso de producción de etanol como la vinaza, tienen potencial para ser empleado en la digestión anaerobia debido a la cantidad de materia orgánica que contiene (García Salazar, 2019 #18; Salazar, 2019 #188 (Barrera-Cardoso, 2020 #206)) a través de la cual se puede generar bioenergía (Arruda et al., 2023) mejorando el balance energético en el proceso de producción de alcohol y la idoneidad ambiental de la eliminación de los residuos (De Carvalho et al., 2023 (Longati, 2020 #213)). Es una tecnología muy eficiente que permite remover la carga de las vinazas en más del 90 % de su DBO, aunque solo un 70 % se corresponde con su DQO, pues una parte se encuentra en una forma no biodegradable; esta fracción es muy baja cuando la materia prima es jugo de caña, muy alta cuando es melaza e intermedia cuando se utilizan mieles A o B. La disposición final de los efluentes generados en el proceso líquidos y sólidos (lodos), se emplean como agua de riego y enmienda orgánica respectivamente en el cultivo de la caña de azúcar, con lo cual se cierra de esta forma el ciclo de los residuales (González Rodríguez et al., 2020).

Además, la digestión anaerobia puede tratar la vinaza de destilería de alta concentración de forma más eficaz que el tratamiento aeróbico en lagunas de oxidación porque degrada las aguas residuales concentradas, produce una pequeña cantidad de lodo, requiere menos energía y produce bioenergía económicamente valiosa (Zorg-biogas.) (Khot, 2021). De esta forma el

tratamiento de vinazas de destilerías por digestión anaerobia para la producción de biogás, es una alternativa prometedora para el tratamiento del residual más agresivo de la industria alcoholera cubana, residuales que en las destilerías del grupo empresarial AZCUBA no son suficientemente gestionados, incumpliendo las normas de vertimiento vigentes.

En Cuba, la aplicación de esta tecnología ha estado limitada en gran medida por el desconocimiento y la poca comercialización de las alternativas tecnológicas existentes (BARRERA-CARDOSO et al., 2018). Actualmente existe una planta de biogás (Heriberto Duquesne, ubicada en la provincia de Villa Clara) para el tratamiento de las vinazas, única de su tipo en el país. La misma cuenta con tres reactores de 1300 m³ de capacidad donde se logra remover aproximadamente el 70% de la DQO contenida en las vinazas (Chanfon & Lorenzo, 2014). Investigaciones realizadas por el ICIDCA (Tabla 3) con el UASB, dieron como resultado el diseño de una tecnología cuyos resultados tecnológicos principales son los siguientes:

Tabla 3. Resultados de investigaciones realizadas por el ICIDCA

Parámetros	Unidad	Resultados
Carga contaminante de los mostos a la entrada del proceso	kg DQO/m ³	65-70
Carga contaminante a la entrada del reactor	kg DQO/m ³	20
Carga contaminante del afluente del proceso	kg DQO/m ³	6
Eficiencia de remoción de la carga contaminante	%	70
Rendimiento de Biogás	Nm ³ /Kg DQO removido	0.45
Rendimiento de Lodo	kg/m ³ de mosto	20

Composición del Biogás		
CO ₂	%	38
CH ₄	%	60
H ₂ S	%	2
Características del lodo biofertilizante		
Nitrógeno	kg/t	2,27
Potasio (K ₂ O)	kg/t	0,03
Fósforo (P ₂ O ₅)	kg/t	0,10

Fuente: Planta de Heriberto Duquesne

El biogás producido en esta planta es conducido hasta la caldera del ingenio azucarero, anexo a la planta, para la generación de vapor como sustituto del petróleo, otra parte del biogás se ha utilizado para la cocción de alimentos de 500 familias de la población aledaña al complejo fabril y para el abastecimiento del comedor obrero de la empresa (Lorenzo et al., 2014).

Estos resultados son comparables a experiencias reportadas en otros países como Brasil, donde se han obtenido eficiencias del tratamiento entre 70 - 90 % de DQO y una producción de metano de 0,35 m³ / kg de DQO removido. El biogás producido puede satisfacer entre el 30 y 45 % de la demanda energética de la destilería, bajos requerimientos de área, bajo consumo de energía, baja producción de lodo y el uso del reactor UASB (reactor de flujo ascendente con lechos de lodo) de fácil construcción, operación y eficiencia.

1.5 Digestión anaerobia como proceso biológico

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual, parte de la materia orgánica contenida en un sustrato es convertida en una mezcla de gases llamada biogás formado principalmente por metano y dióxido de carbono, mediante la acción de un conjunto de microorganismos en ausencia de oxígeno.

Este biogás puede ser capturado y usado como biocombustible para producir energía eléctrica y energía térmica. De esta forma, la digestión anaerobia, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabonos) y al mismo tiempo, producir energía gaseosa (Zorg-biogás.) (Parsaee et al., 2019).

La digestión anaerobia es un proceso esencial en el tratamiento de aguas residuales que ofrece una serie de beneficios ambientales, económicos y sociales. Desde la reducción de la carga orgánica hasta la producción de energía renovable y fertilizantes orgánicos, este proceso juega un papel clave en la búsqueda de soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales y la gestión de recursos (IBEROSPEC, 2024) A continuación, se reflejan algunos de sus beneficios:

- 1. Reducción de la Carga Orgánica:** Al descomponer la materia orgánica presente en las aguas residuales, la digestión anaerobia reduce la carga orgánica que debe ser tratada en los procesos posteriores de tratamiento.
- 2. Producción de Biogás:** La producción de biogás durante la digestión anaerobia ofrece la oportunidad de generar energía renovable de manera sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.
- 3. Generación de Fertilizantes Orgánicos:** El digestato producido durante la digestión anaerobia puede ser utilizado como fertilizante orgánico en la agricultura, proporcionando una fuente de nutrientes para las plantas y cerrando el ciclo de nutrientes.
- 4. Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero:** Al capturar y utilizar el biogás producido durante la digestión anaerobia, se pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático.

El desempeño exitoso de este proceso biológico es altamente dependiente de la composición del sustrato, la estructura de la comunidad microbiana, así como de las condiciones operacionales y ambientales (pH, temperatura, alcalinidad) (Lohani & Havukainen, 2018).

En la DA más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aerobio. Lo anterior implica un bajo rendimiento microbiano y por ende la necesidad de utilizar altos tiempos de retención de sólidos para evitar el lavado de la biomasa activa. Con este fin se recomienda manejar tiempos de retención de líquidos elevados o separación de los tiempos de retención para líquido y sólidos (González, 2016).

La tecnología de DA resulta un método más eficiente, en comparación a otros procesos de conversión biológicos y termoquímicos, tales como el etanol celulósico en términos de relación de salida/entrada de energía (28/1) cuando la biomasa es utilizada en la generación de energía a partir de metano. Otro beneficio de la DA es la reducción de las emisiones de metano ocasionadas por la auto descomposición de la biomasa en terrenos u otros ambientes. Esto está dado por el potencial de calentamiento global del metano estimado en 34 t CO₂ equivalente, si se considera el efecto del retroceso del carbono en el cambio climático, mientras que la tecnología de DA captura y utiliza el metano para la generación de energía, cerrando adecuadamente el ciclo de carbono utilizado por la biomasa para su formación y crecimiento (González, 2016).

La digestión anaeróbica (DA) es una de las tecnologías más adoptadas para la remediación de desechos orgánicos que genera bioenergía (es decir, biogás rico en metano) y fertilizantes orgánicos (Choi et al., 2021). El proceso de DA depende de la actividad metabólica de diversos microorganismos para degradar sinérgicamente materiales orgánicos. Por lo tanto, el rendimiento y la estabilidad del digestor anaeróbico dependen de la estructura y función equilibradas de los diversos grupos microbianos involucrados (Ghofrani-Isfahani et al., 2020).

1.5.1 Etapas metabólicas de la digestión anaerobia

El proceso de degradación anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas. En la práctica ingenieril se acostumbra a considerar tres etapas para residuos sólidos o lodos (hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y

metanogénesis); el enfoque más novedoso lo constituye el de las cuatro etapas o niveles tróficos hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Uddin & Wright, 2023) las cuales se detallarán en los sub epígrafes del 5.1.1.1 al 5.1.1.4 según estudios realizados por (Uddin & Wright, 2023) (Obileke et al., 2021) (Anukam et al., 2019).

El proceso de DA se lleva a cabo a través de una serie de reacciones bioquímicas en las que una comunidad microbiana activa tiene que trabajar conjuntamente. El desempeño exitoso de este proceso biológico es altamente dependiente de la composición del sustrato, la estructura de la comunidad microbiana, así como de las condiciones operacionales y ambientales. Este proceso se subdivide en cuatro etapas bien definidas, las cuales no ocurren de forma secuencial, si no simultánea, y donde cada etapa es desarrollada por un determinado grupo de microorganismos (Ruiz Pulgarín, 2024) (Figura 1), con diferentes velocidades de crecimiento, acción y grado inhibición ante las sustancias que intervienen en el proceso las cuales serán brevemente comentadas a continuación:

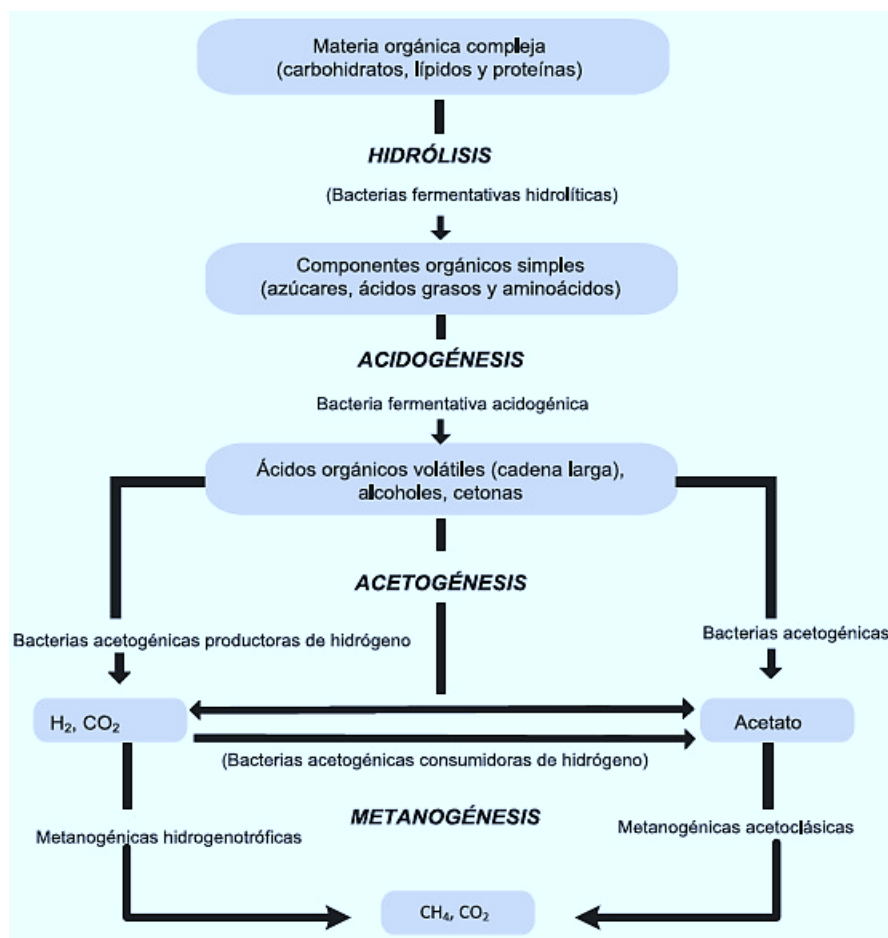


Figura 1. Proceso de digestión anaerobia

1.5.1.1 Hidrólisis

Esta es esencialmente la primera etapa del proceso de digestión. El agua y las enzimas extracelulares descomponen la compleja estructura polimérica de la celulosa, el almidón y las proteínas y las convierten en sus respectivas unidades simples (monómeros u oligómeros), como glucosa, ácidos grasos y aminoácidos.

Las enzimas hidrolíticas generalmente incluyen amilasa, celulasa, lipasa, proteasa y pectinasa. Normalmente, la tasa de crecimiento de las bacterias hidrolíticas es muy rápida. Sin embargo, para sustratos ricos en lignina, la descomposición de los polímeros se convierte en una etapa limitante de la velocidad. Algunos compuestos en esta etapa están listos para convertirse en biogás, pero la mayoría de los compuestos necesitan una mayor degradación a través de otras etapas.

1.5.1.2 Acidogénesis

Los productos de la hidrólisis se descomponen aún más en la etapa de acidogénesis por bacterias acidogénicas. Los productos hidrolíticos se transforman principalmente en ácidos grasos volátiles (AGV) de cadena corta (ácido acético, ácido propiónico, ácido fórmico y ácido láctico), alcohol (etanol, metanol) y cetonas (glicerol y acetona). También se generan como subproductos CO_2 , H_2 , NH_3 , alcoholes y trazas de otros productos. Algunos productos, como CO_2 , H_2 , acetato y formatos, son fácilmente utilizables por los metanógenos en la última etapa. Otros productos deben descomponerse aún más para la etapa de producción de metano. La acidogénesis es generalmente un proceso muy rápido y existe el riesgo de acumulación de AGV en el digestor, lo que provoca toxicidad en el digestor si no se controla adecuadamente.

1.5.1.3 Acetogénesis

Las bacterias acetogénicas transforman los productos de la etapa de acidogénesis y algunos de los ácidos grasos de cadena larga de la etapa de hidrólisis en acetato, CO_2 y H_2 . Las reacciones en la etapa de acetogénesis no

son termodinámicamente espontáneas si la presión parcial de H_2 es superior a 10 - 4 atm. Sin embargo, las bacterias metanogénicas reducen esta presión parcial al consumir el H_2 producido. Esta relación sintrófica, donde algunas bacterias se alimentan de los productos de otras bacterias, hace que la etapa de acetogénesis sea termodinámicamente factible.

Esa transferencia de H_2 entre especies es sinónimo de transferencia de electrones, ya que el H_2 es esencialmente un protón (H^+) con un electrón adicional. La tasa de esta transferencia de electrones puede influir significativamente en la tasa de digestión general.

1.5.1.4 Metanogénesis

Esta es la etapa final donde se produce metano a partir de todos los productos intermedios de las etapas anteriores. Esta etapa es estrictamente anaeróbica ya que las bacterias metanogénicas no pueden sobrevivir en presencia de oxígeno. El CH_3COOH (acetato) y el H_2 son convertidos en CO_2 y CH_4 por dos grupos diferentes de bacterias, como las acetófilas y las hidrogenófilas. Las bacterias acetófilas convierten el acetato en CH_4 y CO_2 , mientras que las hidrogenófilas convierten el H_2 y el CO_2 en CH_4 .

1.5.2 Parámetros ambientales y de control

Para realizar un proceso de digestión anaeróbica adecuado, se deben tomar en cuenta las condiciones favorables para la producción de biogás. Dichas condiciones abarcan temperatura, tipo de sustrato, tipo de inóculo, inhibidores, humedad y pH. Además, es de suma importancia que la digestión sea en un recipiente o reactor impermeable y hermético para evitar el ingreso de oxígeno al sistema, lo cual inhibiría a las bacterias metanogénicas que requieren un medio anaeróbico para su crecimiento. (Jiménez, 2023) analiza estos parámetros que se muestran a continuación puesto que, según las propiedades de la materia prima y el entorno circundante, la optimización de estos parámetros controla la eficiencia y velocidad del proceso de digestión.

1.5.2.1 Temperatura

Dependiendo de la temperatura a la que se desarrolle el proceso de digestión intervienen unas especies bacterianas u otras, variando la velocidad del proceso y el rendimiento en cuantía de metano del gas sintetizado (Guasumba et al., 2019).

Existen tres rangos de trabajo según la temperatura:

1. Psicrófilico: con máximo rendimiento a los 25 °C.
2. Mesófilico: con un rendimiento mayor que el anterior sobre los 35 °C.
3. Termófilico: con un rendimiento mayor que el anterior sobre los 60 °C.

El mantenimiento de las condiciones termofílicas requiere un aporte de calor extraído de combustión del propio gas generado que hace que no compense la utilización de este rango. Cuando mantenemos la temperatura de digestión entorno a los 35 °C obtenemos los mayores rendimientos.

Los cambios de temperatura no afectan de igual forma a todos los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia, la actividad metabólica en las etapas de hidrólisis y acidogénesis no se ve reducida significativamente, debido a la capacidad de adaptación de los microorganismos que intervienen, sin embargo, las etapas de acetogénesis y metanogénesis son limitadas debido a la sensibilidad de los microorganismos a los cambios de temperatura, lo cual, generara una acumulación de AGV

1.5.2.2 Inóculo

El inóculo debe ser seleccionado de forma que asegure la presencia de bacterias metanogénicas para realizar la biodegradación.

1.5.2.3 Humedad

Un exceso o falta de humedad podría perjudicar la producción de biogás. Por lo general, se recomienda que la cantidad de agua sea entre 85 - 90% del peso total, aunque dependerá del tipo de materia prima que se emplee.

1.5.2.4 pH

El pH es otro factor fundamental en el proceso de digestión, ya que, afecta directamente la actividad metabólica de los microorganismos, así como, las rutas metabólicas prevalentes, la solubilidad del sustrato y compuestos intermediarios presentes en el proceso. Los microorganismos anaerobios requieren de diferentes intervalos de pH para su desarrollo, por lo cual, cada grupo microbiano tiene sus propios valores de pH óptimos donde su actividad metabólica es máxima. Se ha reportado como intervalo apropiado para digestión anaerobia 6.8 -7.4. Los microorganismos acidogénicos tienen un pH óptimo entre 5.5 - 6.5, sin embargo, los metanógenos son más eficientes a un pH entre 6.5 - 8.2 siendo 7 el valor óptimo, reduciéndose el crecimiento y la actividad microbiana a niveles de $\text{pH} < 6.6$.

1.6 Tecnologías para el tratamiento anaerobio de las vinazas

La digestión anaeróbica ocurre en un digestor para proporcionar un ambiente libre de oxígeno. Existe una amplia variedad de tecnologías de DA según el contenido de humedad de la materia prima, la frecuencia de alimentación, el tipo de mezcla, la temperatura y otras consideraciones (Montiel-Rosales et al., 2022).

Según la Tabla 4, se han utilizado varios tipos de reactores para el tratamiento con vinaza de caña de azúcar. Sin embargo, se observa que la mayoría de los estudios evaluó el tratamiento de aguas residuales en reactores que operan en una sola fase. En Brasil, las tres tecnologías más utilizadas en la DA de vinaza de caña son las lagunas tapadas, reactor de tanque agitado continuo (CSTR, por sus siglas en inglés) y manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés) (Leme y Seabra, 2017).

Ferraz Júnior et al. (2016) compararon el desempeño de dos reactores UASB (UASB I: de una etapa y UASB II: de dos etapas) en funcionamiento continuo bajo condiciones termófilas. Los autores obtuvieron un rendimiento máximo de CH_4 mayor que el valor en el reactor funcionando en dos etapas, correspondiente al 90,3% del rendimiento máximo teórico de metano ($350 \text{ NmLCH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ DQO}$ eliminado). Además, en este caso se observó un aumento del rendimiento

energético del 25,7% en comparación con el reactor de una sola etapa. Estos resultados sugieren que la separación de grupos promueve mejoras tanto en la eliminación de materia orgánica de las aguas residuales y por tanto en el rendimiento energético recuperado.

Tabla 4. Reactores utilizados en el tratamiento de vinaza de caña de azúcar.

Reactor	Tipo	Rango de temperatura	Referencia
UASB	Una fase	Mesofílico	(Barros et al., 2016)
AFBR	Una fase	Termofílico	(Santos et al., 2014a,b,c) (Santos et al., 2014)
APBR	Una fase	Termofílico	Ferraz Júnior et al., 2015
AFBR	Una fase	Mesofílico	(dos Reis et al., 2015)
UASB+APBR	Una fase	Mesofílico	(Cabrera Díaz et al., 2017)
UASB	Una fase	Mesofílico	Janke et al. (2016)
AFBR	Una fase	Mesofílico	Fernandez ´ et al. (2001)
Reactor híbrido anaeróbico	Una fase	Mesofílico	Kumar et al. (2007)
UASB	Una fase	Mesofílico	Espana-Gamboa et al. (2012)
(SR + MS-UASB) + (UASB + DHS)	Una fase	Mesofílico	Choeisai et al. (2014)
Acidificacion+SSB+UASB+DHS	Una fase	Mesofílico	Onodera et al. (2013)
UASB	Una fase	Mesofílico	Barrera et al. (2014)
APBR	Una fase	Mesofílico	Ferraz Júnior et al. (2014)
AnSBBR	Una fase	Termofilico	Albuquerque et al.(2019)
AFBR	Una fase	Mesofílico/Te rmofilico	Ferreira et al.(2019)
UASB y APBR + UASB	Una fase/dos fases	Termofilico	Ferraz Júnior et al. (2016)
2S-AnMBR	Dos fases	Mesofílico	Silva et al. (2020a)
2S-AnMBR	Dos fases	Mesofílico	Santos et al. (2017)
2S-AnMBR	Dos fases	Mesofílico	Mota et al. (2013)

APBR + (ASTBR + UASB)	Dos fases	Termofilico	Fuess et al. (2017)
UASB	Dos fases	Termofilico	Santana Júnior et al. (2019)
UASB	Dos fases	Mesofílico	Madaleno et al. (2020)

Fuente: (Silva et al., 2021)

Varias tecnologías de DA han sido desarrolladas y establecidas a escala industrial. (González, 2016), dentro de ellas las configuraciones de reactor más comunes son el *CSTR* y *UASB*. El primero con mayor éxito en el tratamiento de residuos sólidos y el segundo para residuos líquidos (Weiland, 2010; España Gamboa et al., 2012), (Fuess et al., 2022)

1.6.1 Lagunas tapadas

El biodigestor de laguna cubierta es un tanque excavado en el suelo, impermeabilizados y cubiertos con material geosintético (p. ej., PVC y HDPE) caracterizado por una baja permeabilidad a fluidos y gases, y lo suficientemente flexible como para acumular biogás. Tiene una base rectangular, de sección trapezoidal e inclinación de pendiente variable, según el terreno. Esta tecnología se ha utilizado ampliamente en áreas rurales para gestionar efluentes de producción animal. Se considera de bajo nivel tecnológico, con facilidad de construcción y operación. En general no dispone de sistemas de calentamiento ni de agitación. Otro aspecto de este modelo es la necesidad de un alto tiempo de retención hidráulica (TRH). Este modelo de biodigestor se utiliza generalmente para el tratamiento de efluentes con baja concentración de sólidos, y una baja tasa de carga orgánica volumétrica (COV). La productividad de biogás por volumen de reactor varía según el tipo de sustrato, OLR, temperatura de funcionamiento y TRH (Kunz, 2022)

1.6.2 Filtros anaerobios

En los filtros anaeróbicos los medios de filtración suelen consistir en estructuras cerámicas y plásticas. Los reactores anaeróbicos de cama empaquetado tienen un tiempo de puesta en marcha muy largo, ya que el biofilm se forma muy lentamente en condiciones anaeróbicas. La COV en el reactor puede ser de hasta 40 kg de DQO/m³d⁻¹. Los reactores de filtración tienen múltiples ventajas:

son simples en diseño, fáciles de operar, no requieren agitación, funcionan establemente incluso en OLR altos, tienen una alta capacidad para soportar cargas tóxicas, y pueden acomodarse a las fluctuaciones en la concentración contaminante. Sin embargo, un aspecto problemático de tales diseños es el tamaño relativamente grande de los digestores, ya que el embalaje ocupa una gran parte de su volumen. El bloqueo en los poros también puede ser un problema, especialmente en altos niveles de lípidos y/o sólidos suspendidos (Kunz, 2022).

1.6.3 Reactor UASB

El biorreactor UASB es espacialmente utilizado con el propósito de remover materia orgánica, producir biogás y recuperar el efluente luego del tratamiento anaerobio. Los UASB son los reactores más implementados para el tratamiento anaeróbico de residuales líquidos, pertenecen a la clasificación de reactores que operan con un flujo continuo de carga, y además con flujo ascendente a una velocidad típica de 1 m h^{-1} , es decir, el afluente entra por el extremo inferior del biodigestor, sube a través del perfil longitudinal, y sale por el extremo superior. Debido a una activa retención de gránulos en el reactor por medio de un separador colocado en el tope del reactor, es posible trabajar a altos tiempos de retención de sólidos y a bajos tiempos de retención hidráulica (TRH) (hasta 2 horas) (Ruiz Pulgarín, 2024). Dada las ventajas de este reactor es posible alcanzar COV de 15 hasta 20 kg DQO $\text{m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ (Lettinga y Hulshoff Pol, 1991); (Borrero-Neninger et al., 2023).

El reactor UASB se considera una tecnología establecida para el tratamiento anaerobio de las vinazas de destilería (Barrera et al., 2014), aguas residuales domésticas, del procesamiento de frutas y de lecherías, entre otras (Leitão et al., 2006).

1.7 Efluentes de la digestión anaerobia

La DA se considera una de las posibles fuentes de energía renovable y, en muchos aspectos, es superior a otras. Convertir en energía los residuos que de cualquier modo se generarían es ambientalmente beneficioso y

económicamente rentable con incentivos. El biogás producido a partir de la DA se puede utilizar directamente como sustituto del gas natural, aunque puede ser necesaria alguna mejora dependiendo de la aplicación final. Hay disponibles varios motores de combustión interna hechos a medida que se utilizan para la producción de electricidad a partir de biogás bruto. Los generadores combinados de calor y energía (CHP) son una tecnología ampliamente empleada en muchas plantas de DA para producir calor y electricidad simultáneamente. En muchos países, la electricidad producida con biogás se suministra directamente a la red principal. El calor producido por la cogeneración se utiliza principalmente dentro de la instalación; pero en algunos lugares el exceso de calor se suministra a la red de calefacción urbana (Uddin & Wright, 2023).

Aproximadamente el 80% del sustrato permanece en el digestor después del proceso de digestión como digestato y conserva la mayoría de los valores nutricionales originales. Este digestato contiene nitrógeno y fósforo, que son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, el uso más beneficioso del digestato es su aplicación directa al suelo como sustituto de fertilizantes convencionales. Los nutrientes digeridos se pueden separar y aplicar para un propósito específico. La porción sólida del digestato se puede convertir en fibras para cama de animales. Otra aplicación emergente de la DA es la recuperación de sustancias químicas intermedias como los ácidos grasos volátiles (AGV). Los AGV son un sustrato útil para la producción de plástico biodegradable y bioenergía. El biogás mejorado se puede convertir en muchos combustibles y productos químicos de plataforma, valorizando aún más la materia prima residual (Uddin & Wright, 2023)

Conclusiones Parciales

1. La vinaza es el residual de la industria alcohólica que se genera con mayor volumen y materia orgánica, por tanto, es el que mayor carga contaminante aporta al medio ambiente.
2. La digestión anaerobia es una opción viable para reducir los efectos nocivos y contaminantes de la vinaza hacia el medio ambiente. Además,

en este tratamiento biológico se obtiene biogás el cual puede emplearse para generar electricidad en un ciclo de potencia o como combustible.

- 3.** El biorreactor que mayor uso tienen en el tratamiento de la vinaza por digestión anaerobia es el reactor de flujo ascendente con lechos de lodo.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló durante el año 2023 en la UEB Derivados Melanio Hernández de Tuinucú y en consideración con los elementos disponibles en la literatura sobre la producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de vinazas, particularmente en la industria alcoholera. Se efectuó un trabajo a partir de un diagnóstico de la disposición de las vinazas que permitió identificar alternativas para elevar la eficacia de su disposición actual; el objetivo del presente capítulo es exponer los métodos, técnicas y las herramientas que se utilizaron para la realización de la investigación.

2.1 Descripción del proceso tecnológico de la producción de alcohol

La empresa azucarera “Melanio Hernández” es un complejo azucarero con destilería anexa, con una molienda potencial de 4 600 t de caña/d y una capacidad de producción de 700 hL/d de alcohol a 100 °GL.

En la destilería, nombrada UEB “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, 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. Para los cálculos se consideran 270 días de trabajo al año y una explotación al 90 % de su capacidad potencial.

La energía consumida en la entidad es suministrada por la empresa eléctrica del municipio y generación propia con fuel oil. El consumo de electricidad es de 22 kWh por hL de producto elaborado. Con este valor se obtiene de acuerdo al promedio anual de producción (85 011,76 hl de alcohol a 100°GL) un consumo de 1 870 258,72 kWh. Esta área dispone de una caldera de vapor acuotubular soviética de 25 t de capacidad potencial de generación de vapor, instalada desde el año 1990 y un turbogenerador de 750 kW, en explotación desde el 1902, que actualmente no se encuentra trabajando producto al deterioro del equipo debido a los años de explotación (Tabla 5). Los condensados generados no se recuperan, lo que contribuye a un gasto adicional de agua, que, unido al mal

estado de las bombas de alimentación de combustible, afectan la eficiencia de la caldera.

Tabla 5. Características de la caldera.

Parámetro	Unidad de medida	Valor
Presión de trabajo (P_v)	kgf/cm ²	10
Tipo de vapor	-	Saturado
Capacidad potencial (P)	t/h	25
Eficiencia (η)	%	86

El proceso de producción de alcohol (Anexo 1) cuenta con tres áreas fundamentales las cuales se describen a continuación.

Área de prefermentación y fermentación: En el área de prefermentación se lleva a cabo la reproducción de la levadura. Para lograr esto es necesario suministrar el oxígeno necesario para la reproducción celular ya que en este proceso aeróbico la levadura consume azúcares y se reproduce. Ya en la fermentación se produce la conversión de los azúcares en alcohol y CO₂, para lo cual se consumen 1 320 m³/día de agua, de ellos, 270 m³/día corresponden al consumo para el enfriamiento de cultivadores y prefermentadores, de lavados de fermentadores y lavado en el CO₂. Además, para la esterilización de los cultivadores se necesitan 3 m³/día (vapor) y para llevar a cabo el enfriamiento en fermentación el consumo de agua es de 170 m³/día.

Área de destilación: En esta área ocurre la recuperación del alcohol existente en los vinos producidos en el proceso fermentativo por la levadura. Es imprescindible para tener bajos índices de consumo de energía trabajar con eficiencia en las columnas de destilación, aprovechar la energía que se va en las corrientes de salida (vinazas) y recuperarlas al proceso, es decir, evitar las pérdidas térmicas. En esta etapa se consumen 456 m³ de vapor/día.

Las aguas residuales generadas en el proceso de producción de alcohol van por registros a una conductora hacia la laguna N^o.1 de residuales.

Resumiendo, en la producción de etanol por vía fermentativa, la operación de fermentación no presenta consumos significativos de energía térmica, no obstante, su influencia o interrelación con la operación de destilación (gran consumidora de vapor), hace necesario que se conozcan cuantitativa y cualitativamente las corrientes donde se consume agua, así como las etapas que mayor influencia tienen en la generación de residuales líquidos debido a la variabilidad que poseen producto de las condiciones operacionales del proceso de producción de alcohol en la destilería.

2.1.1 Procedencia y caracterización del residual de la destilería

Para la caracterización de las aguas residuales que se generan, específicamente de las vinazas del proceso de destilación y de la mezcla de las aguas residuales de todos los procesos, se utilizaron los valores reportados en los informes de caracterización físico-química realizados por el laboratorio de Biogás e Ingeniería ambiental del Centro de Estudio de Energía y Procesos Industriales (CEEPI) de la Universidad de Sancti Spíritus (UNISS). También se reportan investigaciones anteriores que utilizaron las vinazas de esta destilería como sustrato (Barrera et al., 2014), según los métodos estándares, teniendo en cuenta el pH, los sólidos totales, los sólidos volátiles y la demanda química de oxígeno (DQO). Adicionalmente, se revisaron las caracterizaciones anteriores del residual líquido brindado por la UEB, así como el caudal estimado de los residuales por día.

2.1.2 Balance de agua y de aguas residuales

En una destilería las fuentes de corrientes líquidas la constituyen las aguas de enfriamiento, lavado de fermentadores y aguas de limpieza en general. De acuerdo al caudal y concentración de estas corrientes así será el nivel de dilución del mosto. Las aguas de enfriamiento tienen una DBO muy baja y generalmente son recirculadas a torres de enfriamiento y/o sistemas de refrigeración. Por otra parte, podemos afirmar que las variaciones o irregularidades diarias en el caudal y carga orgánica de estos residuales, surgen fundamentalmente en los períodos de limpieza de los fermentadores, tanques de batición y cremas que se realizan en intervalos aproximados de ocho horas.

Con el uso del procesador Microsoft Excel se ejecutaron los balances de masa para determinar el consumo de agua en la producción de alcohol.

Las condiciones de operación de la industria para el desarrollo del trabajo son para una destilería con capacidad de producción de 700 hL diarios, con una eficiencia de 80,98 % para la etapa de fermentación y 98,13 % para la destilación, utilizando como materia prima miel final de caña de azúcar a 85 % brix, 55,25 % de azúcares fermentables, 52 % de azúcares totales y una concentración alcohólica del vino alimentado a la columna destiladora de 5,9 % (v/v).

El proceso de producción de alcohol cuenta con varias etapas consumidoras de agua, pero una de las más importantes es en el equipo conocido como disolutor. El manejo del agua en esta parte del proceso es de gran importancia ya que en ella se prepara la batición a fermentar.

Consumo de agua en la dilución de mieles

Para el cálculo del consumo de agua se utilizaron tres ecuaciones (1-3). Se utilizó un flujo de producción de alcohol anual de 85 011,76 hL de alcohol a 100° G.L para un consumo de batición destilada de 146 959,18 m³, datos reportados en fábrica para el año 2023.

$$V_{AD} = V_B - V_{MF} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$V_{MF} = \frac{I_{AF}}{\rho_{\text{Azúcar a } 85^{\circ}Bx}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$I_{AF} = \frac{AF_{\text{Gay Lussae}}}{0.5525} * \frac{100}{\eta_{\text{Destilación}}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde: V_{AD} : Volumen de agua para dilución (m³), V_B : Volumen de batición destilada (m³), V_{MF} : Volumen de miel final (m³), I_{AF} : Índice de azúcares fermentables (t AF/m³ alcohol a 100° G.L), ρ_{Miel} : Densidad de la miel (1,45 t/m³) $AF_{\text{Gay Lussae}}$: Cantidad de azúcares fermentables según ecuación de Gay Lussae (t AF/m³ alcohol a 100° G.L) y $\eta_{\text{Destilación}}$: Eficiencia en destilación.

Consumo de agua en el enfriadero

El enfriadero cuenta con un volumen total de 3 700 m³, del cual es aprovechable un promedio de 3 400 m³, donde el agua de reposición representa el 10% diariamente según la norma de los centrales azucareros. Para determinar la cantidad de agua de reposición, al igual que su índice de consumo se emplearon las ecuaciones (4-5) que se plantean a continuación:

$$V_{AR} = V_{AE} * 0,1 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$I_{CAR} = \frac{V_{AR}}{700} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde: V_{AR}: Volumen de agua de reposición (m³), V_{AE}: Volumen aprovechable del enfriadero (m³), I_{CAR}: Índice de consumo de agua de reposición (m³ de agua/hL a 100 °G.L).

Gastos en vapor para destilación

Para destilar produciendo la norma potencial (700 hL/día) en alcoholes técnicos A y/o B, se consume 9 t de vapor/hora, las 24 horas al día.

Cuando se adiciona la producción de alcohol Fino A representando en la estructura del plan 2023 el 23,30 %, se consume 5 t/h más de vapor, es decir la caldera debe producir 14 t/h por lo que se incrementa el consumo de agua en ese momento. El consumo de agua en la generación de vapor se determina entonces mediante la siguiente ecuación:

$$C_{AGV} = V_{A,B} + V_A \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde: C_{AGV}: Consumo de agua en la generación de vapor (m³ de agua/hL de alcohol a 100°G.L), V_{A,B}: Consumo produciendo alcoholes A y B (m³ de agua/hL de alcohol a 100°G.L), V_A: Consumo produciendo alcohol fino A (m³ de agua/hL de alcohol a 100°G.L)

Si se elabora Aguardiente Crudo la caldera sube a 11 t/h, pero hay un respaldo productivo por encima de 600 hL a 100°G.L por día de la Norma Potencial, que hace que el índice de agua se mantenga muy similar, además su incidencia en el plan anual es un 5% solamente.

Las aguas de vapor del contacto directo de las columnas destiladora y aguardiente crudo, van con las vinazas para las lagunas de oxidación.

Aguas de lavado y otros usos.

Mediciones aproximadas arrojaron que, entre el agua de lavados de la crema de levadura, de los fermentadores, el laboratorio y el bebedero sanitario, etc., se consumen entre 6,5-6,8 m³/h; para un promedio de 6,65 m³/h. Para la determinación del consumo de agua en el proceso de lavado, se aplica la siguiente ecuación:

$$V_{AL} = Q_{AL} * 0,034 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde: V_{AL}: Volumen de agua de lavado (m³ de agua/hL a 100 ° G.L), Q_{AL}: Flujo de agua de lavado (6,65 m³/h).

El consumo total de agua en el proceso de producción de alcohol en m³ de agua/hL a 100 ° G.L se obtiene realizando la suma de todos los consumos previamente descritos (Ecuación 8).

$$C_{TA} = V_{AD} + I_{CAR} + C_{AGV} + V_{AL} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde C_{TA}: Consumo total de agua (m³ de agua/hL a 100 ° G.L)

Este balance es aplicable para la estimación de los residuales líquidos con solo restarle los m³ de agua/hL a 100° G.L de Reposición al Enfriadero y añadirle el volumen de miel que es de 0,3 m³ de miel/hL a 100° G.L.

Residuales Líquidos Totales

El balance anterior es aplicable para la estimación de los residuales líquidos con solo restarle los m³ de agua/hL a 100° G.L. de reposición al enfriadero y añadirle el volumen de miel que es alrededor de 0,3 m³/hL. Por todo ello, la gran reserva de reducir caudal es mejorar el % Alcohólico en fermentación y % de Eficiencias en Fermentación. Esta combinación disminuye también la carga contaminante al reducir la cantidad de DQO generada por día.

Índice de generación de vinazas

Otro aspecto que se reporta sobre estos balances de consumo de agua son los realizados por (Salazar, 2016) y será de interés en el análisis donde se expresa la influencia del grado alcohólico en el volumen de los residuales, según la expresión:

$$V_{vinaza} = F_{vino} + F_{vapor} - V_{alcohólico} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde: V_{vinaza} : Volumen de vinaza ($m^3/año$), F_{vino} : Flujo del vino a destilar (146 959,178 $m^3/año$), F_{vapor} : Flujo de vapor para la etapa de destilación (4 227,43594 $m^3/año$) y $V_{alcohólico}$: Volumen de alcohol obtenido (8 663,516 $m^3/año$).

2.2 Bases para el diseño de la planta de biogás

En este epígrafe se exponen las ecuaciones de diseño y balances de masa para determinar el potencial de producción de biogás en el tratamiento de vinazas de destilería con la tecnología de reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés). Para ello se tiene en cuenta las características físico-química de las vinazas a partir de la fermentación de mieles intermedias de la producción de alcohol, se enuncian las principales etapas de tratamiento de la planta de biogás para generar energía eléctrica y teniendo en cuenta las premisas del caso de estudio se calcula el potencial de producción de biogás y todas las corrientes involucradas en esta tecnología.

2.2.1 Descripción de la tecnología de producción de biogás

Para la propuesta de planta de biogás se tuvo en cuenta la experiencia existente en la destilería Heriberto Duquesne de la provincia de Villa Clara donde se encuentran en operación tres reactores UASB de 1 600 m^3 , cada uno en paralelo. Las etapas del proceso se representan en el Anexo 2 y se describen a continuación:

1. Tratamiento preliminar

Las aguas residuales a la salida de la destilería tienen una temperatura de 95-100°C aproximadamente y una concentración de 48 kg DQO / m^3 , con un pH entre 4-5, por lo que se necesita de enfriamiento y alcalización. Para utilizar parte

del calor de las vinazas hay que instalar un intercambiador de calor en la destilería para disminuir la temperatura hasta 85°C, mientras se incrementa la temperatura de la batición. De aquí las vinazas son enviadas a zanja y se mezclan con el resto de las corrientes de aguas residuales de la fábrica, de donde se transportan a la planta de biogás. En la planta se colectan en una piscina de enfriamiento donde se van enfriando por medio de aspersores. También intercambian calor con las vinazas postratadas del reactor UASB y luego con agua, bajando su temperatura hasta 37°C lo que permite lograr la temperatura adecuada del medio (régimen mesofílico). Se debe usar un período de recirculación del efluente del reactor no superior a 7 h por día.

A continuación, se ajusta el pH de las vinazas a alrededor de 7 con una solución de cal (se necesitan 3,7 kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (85 %) por m^3 de vinaza), proceso que ocurre en discontinuo en un tanque de acero inoxidable agitado con control de pH. De aquí la vinaza neutralizada es enviada a los sedimentadores preacidificadores (tanques SP), los cuales tienen como función sedimentar la cal no disuelta y las bacterias acidogénicas suspendidas que se producen en el proceso de acidificación. La DQO de la vinaza a alimentar al reactor anaerobio debe ser de 20 kg DQO/ m^3 , de lo contrario debe usarse agua cruda para diluirla.

2. Digestión anaerobia

Los reactores UASB deben trabajar con bajos tiempos de retención hidráulico (6 horas - 2 días) y para evitar el lavado de lodos a la salida de los reactores, poseen un equipo separador de gases, sólidos y líquidos muy eficiente, a la vez que la operación en flujo ascendente garantiza la formación de un lodo granular de alta sedimentabilidad.

3. Disposición final del residual tratado:

El efluente líquido de los reactores UASB es recogido por unos canales de derrames, situados a ambos lados de los reactores y conducido por una tubería a la salida de los reactores para su disposición final en una laguna terciaria, y de allí al sistema de fertirriego de la caña, mediante pipas cisternas, cumpliendo con la normativa cubana de riego.

4. Adecuación y almacenamiento del biogás

El gas obtenido pasa a un sistema de desulfuración compuesto por una torre de lavado y a un reactor de desulfuración para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H₂S). Una vez desulfurado se propone almacenar en un gasómetro de polietileno de alta densidad.

5. Secado y despacho de lodos

Los lodos generados en el fondo de los reactores UASB junto con los lodos del SP son bombeados hasta el área de secado de sólidos, compuesto por 10 secciones de secado al sol. Aquí se elimina el 90% de la humedad después de 10 días de exposición y se obtiene un producto de excelentes propiedades.

6. Servicios auxiliares. Agua de proceso

El suministro de agua industrial es mediante el bombeo de agua de río. El máximo consumo de agua industrial de este sistema es de 85 m³/d que incluye enfriamiento de la vinaza, preparación de la cal, preparación de nutrientes y analítica del laboratorio de control.

2.2.2 Diseño del equipamiento

Etapas 1. Tratamiento preliminar.

Diseño del intercambiador de calor

Se calcula el área por el método diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD)

$$A = \frac{Q}{U * LMTD} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$Q = F * cp * \Delta T \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln(T_A - T_b)} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\Delta T_A = T_1 - T_4 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\Delta T_B = T_2 - T_3$$

Ecuación 15

Donde A es la superficie mínima de intercambio, Q es la cantidad de energía transferida (kW), F es caudal másico expresado (kg), cp es el calor específico (kcal/kg °C) y ΔT es la diferencia de temperatura del sustrato en este caso vinazas, U es coeficiente global de transferencia de calor, LMTD es la diferencia de temperatura media logarítmica, T₁ es la temperatura de entrada del fluido caliente (95 °C), T₂ es la temperatura de salida de fluido caliente (85 °C), T₃ es la temperatura de entrada del fluido frío (37 °C), T₄ es la temperatura de salida de fluido frío (45 °C).

Diseño de la piscina de enfriamiento.

Los enfriaderos deben cumplir un mínimo de requisitos para que puedan operar eficientemente, más aún cuando nuestro clima se manifiesta con alta temperatura y humedad relativa que constituyen las resistencias más fuertes para un adecuado trabajo. Por ello se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La capacidad en galones por minuto es igual al rechazo.
- La superficie de la taza o piscina, en pie² varía según las características de diseño (con ramilletes de 4 o 5 atomizadores)

a) Con ramilletes de 4 atomizadores:

- 3 hileras

b) Con ramilletes de 5 atomizadores:

- 3 hileras
- Atomizadores de 50 gpm de capacidad cada uno.
- Ramilletes de 4 atomizadores en cruz o de 5 en estrellas, siempre a 10 pie de diámetro.
- Distancia entre hileras: 15 pie en todos los casos.
- Distancia entre ramilletes de la misma hilera: 15 a 25 pie, según el número de hileras, a base de lo siguiente (15 pie para 3 hileras).
- Distancia marginal, en cada uno de los lados desde el centro del ramillete al borde de la piscina: 20 pie para el lado de donde soplan los vientos 30

pie para el lado opuesto. Si los vientos no son predominantes en una dirección, usar 25 pie en cada lado.

- Distancia de centro a centro de un atomizador a otro del mismo ramillete: 10 pie.
- Capacidad volumétrica mínima de la taza: 2 veces el volumen que haya contenido en el sistema a partir del nivel superior del túnel o conducto de agua fría.
- Altura mínima desde el borde de la boquilla del atomizador hasta el nivel del agua: 4 pie
- La distancia entre ramilletes de la misma hilera que varía desde 15 pie hasta 25 pie debe quedar perpendicular a la dirección de los vientos reinantes.

Diseño del tanque de alcalización con agitación (TAA)

Para el diseño de este tanque primero se tiene que calcular la cantidad de Ca(OH)_2 por m^3 de vinaza (ecuación 16).

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{F_{\text{residuales}} * 3,7}{1000} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$F_{\text{total}} = F_{\text{residuales}} + \text{Ca(OH)}_2 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$V = \frac{F_{\text{total}} * \%_{\text{aprovechamiento}}}{4} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * \frac{V}{H}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde: Ca(OH)_2 : Consumo de hidróxido de calcio (t/d), $F_{\text{residuales}}$: Flujo de residuales (m^3/d), Índice de consumo de Ca(OH)_2 igual a 3,7 kg/m^3 de vinaza, F_{total} : Flujo total que entra al tanque de alcalización, 90 % de aprovechamiento para cuatro ciclos diarios, D: Diámetro (m), V: volumen (m^3), H: altura (6 m).

Selección de Agitadores del TAA.

Para realizar la mezcla de los sustratos se instalará un sistema de agitación. La potencia del motor del equipo se debe considerar entre 5 - 8 (W/m^2) por superficie

superior de reactor, mientras que la potencia de agitación se calcula por la ecuación 20.

$$P_{agitación} = P_{motor} * A \quad \text{Ecuación 20}$$

Dónde: $P_{agitación}$: Potencia de agitación y A: Área del tanque (m^2)

Diseño de los sedimentadores preacidificadores (tanque SP)

El espesor de las paredes de los tanques se ha previsto que sea de 0,5 m y con una altura igual a 6 m. El piso del tanque tendrá una pendiente del 0,5% hacia la tubería de descarga de arenas. La tubería de salida hacia el digestor está ubicada 10 cm más arriba del fondo del tanque para que arenas acumuladas en el fondo no descarguen en el digestor.

$$V_{efectivo} = TRH * V_{residual} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$V_{total} = V_{efectivo} * 1,1 \quad \text{Ecuación 22}$$

$$A = \frac{V_{total}}{h} \quad \text{Ecuación 23}$$

Dónde: $V_{efectivo}$: Volumen efectivo del tanque ($m^3/día$), TRH: Tiempo de retención hidráulica (días), $V_{residual}$: Volumen de residual líquido ($m^3/día$), V_{total} : Volumen total del tanque (m^3), A: Área del tanque (m^2) y h: altura del tanque.

Etapa 2. Digestión anaerobia

Diseño del reactor anaerobio UASB.

Para el diseño del reactor UASB se asume una velocidad reportada por (Barrera et al., 2016) igual a 2,4 m/h empleando las siguientes ecuaciones:

$$V_{reactor} = \frac{COV * DQO}{F_{residuales}} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$Altura = \frac{V_{reactor}}{Área} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$Área = \frac{F_{residuales}}{Velocidad} \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde: V_{reactor} : Volumen del reactor UASB (m^3), COV: carga orgánica volumétrica ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ d}$), DQO: Demanda Química de Oxígeno ($\text{kg DQO}/\text{m}^3$), $F_{\text{residuales}}$: Flujo de residuales de entrada al reactor (m^3/d).

Etapla 3. Disposición final del residual tratado.

Sistema de Lagunas

Una laguna terciaria es un sistema de tratamiento de aguas residuales que consiste en una serie de estanques o lagunas naturales artificiales que se utilizan para purificar y filtrar el agua residual. El diseño de una laguna terciaria debe tener en cuenta varios aspectos importantes, como la topografía del terreno, el tipo de suelo, la calidad y cantidad de agua a tratar, la disponibilidad de espacio y los requisitos de tratamiento de la normativa ambiental. Para este caso se aprovecha el sistema de lagunas existentes para el tratamiento de las aguas residuales de la destilería Melanio Hernández compuesta por cinco lagunas y una laguna S para el enfriamiento. En la tabla 6 se muestran los volúmenes correspondientes a este sistema.

Tabla 6. Volumen aprovechable del sistema de lagunas.

Lagunas	Volumen aprovechable (m^3)
1	112 500
2	32 500
3	39 000
4	121 230
5	36 750
S	107 139

Etapla 4. Adecuación y almacenamiento del biogás

Sistema de desulfuración

Se sigue la metodología empleada por (Barreras et al., 2015). En la eliminación de sulfuro por absorción en quelatos férricos de EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), se produce una absorción física con transferencia de masa y reacciones químicas. La solución absorbente contiene el complejo de hierro $\text{Fe}3\text{pLn}$, que oxida el sulfuro de hidrógeno a azufre elemental, reduciendo

Fe₃pLn a Fe₂pLn en un primer reactor, y posteriormente se forma el complejo de hierro (Fe₃pLn) regenerado en un segundo reactor con adición de aire. Las ecuaciones (28-31) describen el cálculo necesario para el dimensionamiento de las columnas de desulfuración.

$$A = \frac{Q}{v} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$H = 4 * D \quad \text{Ecuación 30}$$

$$V = H * A \quad \text{Ecuación 31}$$

Dónde: A: Área de la sección transversal (m²), Q: Flujo de biogás (1 220,77 m³/h), v: Velocidad de diseño del gas (0,29 m/s), D: Diámetro (m), H: altura (m) y V: volumen (m³).

Gasómetro

La selección del gasómetro habitualmente viene dada por los requerimientos de almacenamiento y variaciones en la producción del biogás. En general, se puede dimensionar considerando una elongación máxima para EDPM (membrana) de un 20% por sobre el volumen total del digestor, pero puede variar considerablemente dependiendo de los consumos y generación. Para el cálculo de volumen del gasómetro, se debe considerar la ecuación 34 junto a un factor de seguridad (F.S.) del 12 %:

$$V_{\text{gasómetro}} > Q_P * (1 - T_c) * 0,24 \quad \text{Ecuación 34}$$

V_{gasómetro}: Volumen del gasómetro (m³/día), Q_p: Producción de biogás (m³/día).

Etapas 5. Secado y despacho de lodos

Lecho de secado de lodos

Para diseñar el lecho de secado (ecuación 35-36) se emplea la metodología aplicada por (Dueñas, 2017).

$$A_s = \frac{365 * P_l}{L_{ss}} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$a_{ls} = L_{ls} = \sqrt{A_s} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde: A_s es el área superficial del lecho de secado (m^2), P_l es la carga total de lodo (kg/d); L_{ss} es la carga superficial de lodo (150 kg ST/ m^2 /año), a_{ls} : ancho del lecho de secado (m); L_{ls} : Largo del lecho de secado (m).

2.3 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 va 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 análisis energético en cada alternativa.

2.3.1 Análisis energético

Para la valoración energética se consideró alimentar el biogás a un grupo electrógeno, con lo cual se obtiene energía eléctrica para ser vendida a la red (EE) y energía térmica proveniente de los gases de escape (ET), recuperada en una caldera de recuperación para producir vapor a baja presión. Otros escenarios que se recomiendan es usarlo directamente para generar vapor en la caldera de la fábrica o para la cocción de alimentos.

Los cálculos se realizaron para una planta que trabaja 270 días al año, a la cual se alimentan 1535,88 m³d⁻¹ de vinaza (1,68 m³ vinaza hL⁻¹ alcohol). Se partió de calcular el potencial de biogás que se es capaz de generar a partir de las vinazas de la destilería.

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 0,335 m³/kg, reportado por (Barrera et al., 2014), para reactor UASB utilizando vinaza de la propia destilería Melanio Hernández.

$$V_{CH_4} = Q_v * DQO * \left(\frac{Ef_{DQO}}{100} \right) * y_{CH_4} * 0,90 \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$V_{Biogás} = \frac{V_{CH_4}}{\% CH_4 / 100} \quad (\text{Ecuación 38})$$

Donde: V_{CH_4} : Volumen de metano (m³/día), Q_v es el flujo volumétrico de las vinazas (m³/día), DQO es la Demanda Química de Oxígeno de las vinazas (kg DQO/m³), se utilizó un valor promedio reportado (63,5 kg/m³), Ef_o es la eficiencia de remoción de DQO (70% de remoción), $V_{Biogás}$ es la cantidad de biogás producido (m³/día), y % CH₄ el contenido de metano en el biogás (58,5%).

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°C) se puede utilizar en el calentamiento del reactor, y la de los gases de escape (450°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 37-40.

$$EE = V_{Biogas} * VC_{Biogas} * \eta_e \quad (\text{Ecuación 39})$$

$$ET = V_{Biogas} * VC_{Biogas} * \eta_t \quad (\text{Ecuación 38})$$

$$EE_C = P_{Et} * IC_e \quad (\text{Ecuación 39})$$

$$V_{Biogas,EE} = \frac{EE_C}{EE} * V_{Biogas} \quad (\text{Ecuación 40})$$

Dónde: EE es la Energía eléctrica generada (kWh/d), ET la Energía térmica generada (kWh/d), V_{Biogas} es la cantidad de biogás producido a partir de las vinazas ($m^3/día$), VC_{Biogas} el valor calorífico del biogás (6 kWh/ m^3), η_e es la eficiencia eléctrica de grupo electrógeno (%), η_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 kWh/hL), P_{Et} es la producción de etanol (700 hL/d), $V_{Biogas,S}$ la cantidad de biogás requerido para la generación de energía eléctrica ($m^3/año$). Los valores de η_t y η_e están en función de la capacidad del motor instalado, para lo cual se consultaron catálogos de proveedores de motores a biogás (Zorg-biogas., 2024).

Alternativa 2. Generación de energía térmica en caldera

El vapor es producido por una caldera acuotubular 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 requerida para suplir esta demanda de vapor se utilizaron las ecuaciones 41-43.

$$ET_C = Mv * H * Qv * 1000 * 0.000278 \quad (\text{Ecuación 41})$$

$$M_{fuel\ oil} = \frac{ET_C}{PCI_{fuel\ oil} * 0.278} \quad (\text{Ecuación 42})$$

$$V_{biogas,ET} = \frac{ET_C}{PCI_{biogas} * 0.000278} \quad (\text{Ecuación 43})$$

Dónde: 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 (1 961 kJ/kg), $M_{Fuel\ Oil}$

es el consumo de fuel oil de la caldera (t/día), $PCI_{\text{fuel oil}}$ es el poder calorífico inferior del fuel oil (46 526 kJ/kg), PCI_{biogas} es el poder calorífico inferior del biogás (21 604 kJ/m³) y $V_{\text{Biogas,ET}}$ la cantidad de biogás requerido para la generación de vapor (m³/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 m³ biogás/vivienda, valor publicado por (Barrera et al., 2014) para redes de biogás, y 0,15 m³ biogás/comensal para comedores (Hermida García, 2023).

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 son 465 comensales en el período de zafra de 90 días y 405 en período de no zafra de 180 días, mientras que en el comedor de la destilería son 115 comensales. Se considera que solo se puede cubrir 270 días con el servicio de 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 (López-Savran & Suárez-Hernández, 2018).

2.3.2 Análisis económico

Para la realización del análisis económico se utilizó la metodología utilizada por (Peters et al., 1991). En el cual se determinaron los costos de inversión para una tasa de interés de un 15%. También se tuvo en cuenta que al ser la materia prima un agua residual es libre de costo.

La depreciación se consideró lineal a lo largo de 20 años para estructuras físicas y de 10 años para el equipamiento técnico instalado. El capital se remunera a una tasa de interés de 10%. Se asume una tasa de inflación del 8% y una tasa de impuesto del 30%.

Para la valoración económica se determinó el costo total de inversión, el costo total de producción y el flujo de caja para cada alternativa de estudio. Para el cálculo del capital fijo invertido y el capital total de la inversión se utilizó la metodología recomendada por (Peters et al., 1991).

La estimación del equipamiento para la planta de biogás se realizó de acuerdo a la regla a la 0,6 y se actualizó su valor. En este caso se utilizó como referencia la oferta realizada por la empresa alemana Biogás Nord a la UEB Melanio Hernández de \$ 911 556 para el costo del equipamiento para un volumen total de reactores de 6 231 m³. A este se le añade el costo del equipamiento para el pre-tratamiento y el del grupo electrógeno, el cual incluye sistema de recuperación de calor y la interconexión a la red eléctrica.

Como planta de referencia para estimar la inversión de la planta de biogás para la vinaza se usó la planta de Heriberto Duquesne, en la provincia Villa Clara (Jiménez et al., 2004) con una inversión de \$1 967 377,00 para un volumen total de reactores de 6 231 m³.

Para los ingresos de la planta de biogás se tuvo en cuenta la venta de la electricidad generada, la sustitución del petróleo consumido fuera de zafra por la destilería, la venta del CO₂ dejado de emitir respecto a la situación de referencia, la venta del fertilizante orgánico, la venta del agua de riego y el servicio de tratamiento de la vinaza.

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. En la tabla 7 se muestran los índices y precios para los cálculos.

Tabla 7. Precios e índices en CUP y USD

Precios en CUP (Hernández, 2024)	
Fuel oil	10,69 CUP/L
Electricidad	9,7626 CUP/kWh
Precios en USD e índices (Tricado Pacheco, 2024)	
Fuel oil ponderado para calderas	355 USD/t

Fuel oil ponderado	292 USD/t
CO ₂ evitado	0,8674 t CO ₂ eq/MWh
CO ₂ evitado	0,002481869 t CO ₂ /t fuel oil

Este análisis se confirma con el cálculo de los indicadores dinámicos del Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión (PRD), para lo cual se utilizaron los datos de inversión y costos operacionales publicados por (Alba-Reyes et al., 2024).

2.3.3 Análisis ambiental

La evaluación ambiental del ciclo de vida del biogás empleando como sustrato las vinazas del proceso de producción de alcohol se realiza aplicando los principios y requisitos de las normas internacionales sobre ACV (14040, 2009; 14044, 2009), la metodología de ACV propuesta por (Contreras, 2007) y la mostrada por (Barreras, 2016) para la modelación de los ICV parametrizados de la producción de biogás.

2.3.3.1 Definición del Objetivo y Alcance del estudio

La definición del objetivo(s) de un ACV y del alcance, determina las operaciones y/o procesos unitarios a incluir en el estudio, así como los flujos del inventario a modelar. Por tanto, es necesario que estén claramente definidos y sean coherentes con la aplicación prevista. En este estudio se plantea como objetivo y alcance comparar el impacto ambiental de las alternativas disponibles para el tratamiento de las vinazas asociado a la producción de biogás. La unidad funcional, los límites del sistema, la descripción de los escenarios, los principios de asignación y los principales supuestos se describen en detalle a continuación.

2.3.3.2 Función y unidad funcional

La función principal de la producción de biogás a partir del tratamiento de las aguas residuales de destilería es suplir la demanda de fuel oil en Cuba empleando una fuente de sustrato disponible en el territorio nacional; lográndose con esto beneficios económicos para el país al eliminar la importación del mismo. Todos los flujos de entrada y salida al sistema estarán referidos al tratamiento

de las aguas residuales en un ciclo productivo como unidad más representativa de los mismos (unidad funcional).

2.3.3.3 Límites del Sistema

El estudio se limita al objetivo establecido y al conocimiento del ciclo de vida del sistema. En la Figura 2, se enmarcan por líneas discontinuas el subsistema incluido dentro de los límites del sistema. En este estudio es importante determinar el perfil ambiental del sistema industrial para analizar la factibilidad de producción de biogás. En función de la inclusión de subsistemas el estudio se clasifica “de la puerta a la puerta”.

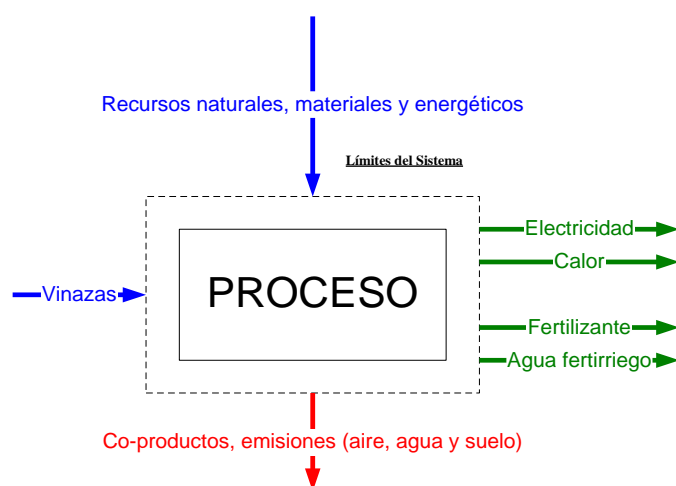


Figura 2. Modelo del ciclo de vida del biogás producido a partir de vinazas.

Se considera el proceso de tratamiento de vinaza y aguas residuales (que incluye tres subprocesos: producción de biogás, remoción de sulfuros y generación de energía), seguido de los subprocesos para el tratamiento del efluente líquido de la producción de biogás en las lagunas (lagunas de postratamiento), el bombeo de fertirrigación (del efluente líquido de las lagunas) y el secado de los lodos (lodos de la producción de biogás).

2.3.3.4 Análisis del inventario del ciclo de vida (AICV)

En esta etapa se relaciona toda la información cualitativa y cuantitativa requerida para conformar el Inventario del Ciclo de Vida (ICV). En la práctica, el ICV es una lista de recursos, productos, co-productos y emisiones.

Flujos del inventario

De acuerdo a la NC-ISO 14 044 (2009), existen tres tipos de flujos principales: elementales, intermedios y de productos. En la tabla 8 se agrupan los flujos elementales y de productos, en entradas o salidas a los límites del sistema. Los flujos entre las diferentes operaciones unitarias se clasifican como intermedios.

Tabla 8. Flujos del ICV de la producción de biogás.

Aportes de la tecnosfera			
Compuesto férico	Agua		SO _x
Óxido de calcio	Vinaza		Energía
Recursos de la ecosfera			
Terreno utilizado	Oxígeno en el aire		
Emisiones a la ecosfera			
Emisiones gaseosas	Desechos químicos		Gases de combustión
Productos			
	Calor		Agua de fertirrigación
Electricidad	Fertilizante (carbón orgánico y azufre)		Digestato y aguas residuales para fertirriego
Flujos internos			
Efluente líquido	Energía	Lodo	Biogás

Principios de asignación y supuestos principales

Los principales supuestos para este estudio son los siguientes:

1. Todos los cálculos se basan en 1 día de operación para representar el rendimiento diario de las diferentes alternativas.
2. Las emisiones gaseosas de las lagunas se calcularon a partir de la multiplicación de la productividad de metano RCH₄ (Lm⁻²d⁻¹) y el área

ocupada de las lagunas, donde DQO_r es la DQO eliminada (kg DQO d^{-1}) y T_a es la T ambiente promedio ($^{\circ}\text{C}$) (Toprak, 1995; Wu y Chen, 2011).

$$R_{CH_4} = 0,456 * (DQO_r)^{0,243} * T_a^{0,856} \quad \text{Ecuación}$$

3. De la composición del biogás de la laguna reportada en (Safley Jr & Westerman, 1988), los contenidos de metano y dióxido de carbono fueron del 70% y el 20% para las emisiones gaseosas de las lagunas, respectivamente. Se supuso que el 10% restante estaba compuesto principalmente de vapor de agua.
4. La tasa de carga orgánica (OLR, basada en DQO biodegradable) de las lagunas fue de $0,04 \text{ kg DQO m}^3/\text{d}$ para todas las alternativas. Además, se fijó la profundidad y la concentración de DQO del efluente para calcular el terreno utilizado.
5. La producción de lodos en las lagunas se determinó mediante cálculos de balance de masa asumiendo que el 10% de la DQO extraída se convierte anaeróbicamente en biomasa (Braun, 2007). Se supuso que el contenido de DQO de la biomasa era de $1,222 \text{ kg de DQO/kg de biomasa}$ (Kalyuzhnyi & Fedorovich, 1998) y el contenido de agua del lodo (antes del secado) del 80% (p/p). Se supuso que el contenido de carbono de la biomasa era de $0,0313 \text{ kmol C kg de biomasa de DQO}$ (Batstone et al., 2002). El carbono orgánico se tomó de la base de datos 2.2 de ecoinvent como “Carbono, en materia orgánica, en el suelo” y se supuso que se consumía en las alternativas. Por ejemplo, la alternativa con mayor producción de carbono orgánico no consume/extrae carbono orgánico del suelo.
6. El potasio, el fósforo y el nitrógeno no se consideraron fertilizantes químicos (productos evitados) porque se supuso que eran constantes entre las alternativas.
7. El contenido de azufre de la torta de filtración varió en función del nivel de H_2S requerido para las tecnologías de generación de energía, mientras que el contenido de carbono orgánico del digestato varió en función de la tasa de producción de biogás y la emisión de metano en las lagunas.

8. Las eficiencias de eliminación de DQO y sulfato (66,7% y 87%, respectivamente), la composición del biogás ($\text{CH}_4 = 58,5\%$, $\text{CO}_2 = 40\%$ y $\text{H}_2\text{S} = 1,5\%$), la tasa de carga orgánica ($9,83 \text{ kg DQO m}^3/\text{d}$), la tasa de carga de sulfato $2 \text{ m}^3/\text{d}$, y las concentraciones de DQO y sulfato ($0,45 \text{ kg SO}_4$ de vinaza (48 kg DQO m^3 y $2,2 \text{ kg SO}_4/\text{m}^3$) se supusieron como en (Barrera et al., 2014).
9. Se asumió una pérdida de metano del 2% durante los subprocesos de producción de biogás, eliminación de sulfuros y generación de energía.

2.3.3.5 Modelación del ICV parametrizado

Con base en los principios de asignación y supuestos principales descritos se llevó a cabo el ICV. Para garantizar la confiabilidad y validez de los datos, las entradas y salidas de las alternativas estudiadas se calcularon utilizando balances de materia y energía. La consistencia de la masa se comprobó mediante balances de masa total, DQO, carbono y azufre, mientras que para calcular las necesidades de energía se utilizó la primera ley de la termodinámica. La infraestructura fue excluida de este estudio.

Para el análisis del ACV se utilizó el software libre OpenLCA versión 1.3.1 (Openlca, 2014) con la Base de Datos (BD) Ecoinvent 2.2 y la metodología ReCiPe con categorías de impactos finales en una perspectiva jerárquica (Goedkoop et al., 2008).

2.3.3.6 Evaluación de impacto

La evaluación de impactos ambientales se realiza con el método ReCiPe 2016 con la asistencia del software de código abierto para la evaluación de la sostenibilidad, OpenLCA versión 1.3.1 ([http:// www.openlca.org/](http://www.openlca.org/)). Este método muestra los resultados a nivel de punto intermedio (Midpoint) con 18 categorías de impactos y de punto final (Endpoint) con tres categorías de daños (salud humana, ecosistemas y recursos). Siempre que sea posible, se utilizan los procesos modelados en la misma base de datos (Ecoinvent) correspondientes a igual región geográfica para garantizar que los procesos empleados respondan a similares indicadores de la calidad de los datos.

Conclusiones Parciales

1. Para el diseño del sistema de obtención de biogás se seleccionó un reactor anaerobio UASB con un gasómetro de polietileno de alta densidad para el almacenamiento.
2. Para la evaluación técnica, económica y ambiental se consideraron tres alternativas de uso del biogás obtenido a partir de las vinazas, que incluyeron la obtención de energía eléctrica y térmica con grupo electrógeno, generación de energía térmica en calderas y uso directo para la cocción de alimentos.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se hace una valoración energética, económica y ambiental de las alternativas de uso del biogás obtenido a partir de vinaza. Se utiliza como estudio de caso la Unidad Empresarial Básica (Hernández) Melanio Hernández, ubicado en Tuinicú, municipio Taguasco, en la provincia Sancti Spíritus. Esta unidad cuenta con una capacidad de producción de 700 hL d⁻¹ de alcohol Técnico “A y B” y opera un promedio de 270 días al año. Se considera que el biogás producido será destinado a alimentar un motor de combustión interna, en el que se obtendrá energía eléctrica para su venta a la red y usar el calor residual de los gases de escape como fuente energética para cubrir la demanda térmica.

3.1 Diseño de la planta de biogás

3.1.1 Caracterización físico-química de las vinazas de la destilería

En el proceso de producción de alcohol se genera un flujo de 1 535,88m³/d de aguas residuales (2,44 m³/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 (Tabla 9). Las vinazas, el residuo del proceso de destilación, constituyen el residual más contaminante con un flujo de 1 057,40 m³/día (1,68 m³/hL).

Tabla 9. Resultados de los balances de aguas residuales en la destilería

Parámetro	Unidad	Resultado
Dilución de Mieles	m ³ de agua/hL a 100 ° G.L	1,49
Reposición al Enfriadero	m ³ de agua/hL a 100 ° G.L	0,49
Gastos en vapor para Destilación	m ³ de agua/hL a 100 ° G.L	0,42
Lavados y Otros Usos	m ³ de agua/hL a 100 ° G.L	0,23
T O T A L	m ³ de agua/hL a 100 ° G.L	2,62
Total de residuales líquidos	m ³ de agua/hL a 100 ° G. L	2,44

En la tabla 10 se muestra la caracterización de las aguas residuales de la destilería Melanio Hernández. En estas la concentración de las vinazas es superior 60 g/L de DQO, según valores reportados en investigaciones anteriores que utilizaron las vinazas de esta destilería como sustrato ^(6, 7). Las aguas residuales del resto de las corrientes diluyen la DQO hasta 48,1 g/L, valor promedio obtenido en el período 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 10. Caracterización físico-química de las vinazas de la destilería del caso de estudio.

Parámetros	Unidad de Medida	UDI-CEEPI 2017-2024	Barrera, 2014	López González, 2017
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	1999,0	N.A.	N.A.
COT	g/kg	N.A.		21,7
NT	g/kg	N.A.		0,6
pH	-	4.4	4,8	4,8
PT	g/kg	N.A.		0,1
Sulfato	g/kg	N.A.		1,8
C:N ratio				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.

Con estos resultados se puede entender que las aguas residuales o vinazas son residuales líquidos de gran agresividad y de fuerte contaminación al medio. El mayor aporte de la materia orgánica expresada por los valores de DQO y DBO, está en la etapa de fermentación, lo que evidencia la existencia de derrames, salideros y lavados excesivos que comprometen la carga orgánica del residual de este subproceso y su valor es muy superior al de la destilación que sí se conoce origina un residual de elevada carga orgánica. Ello trae como resultado el consumo del oxígeno disuelto en el agua necesario para que ocurra la degradación de la materia orgánica; su concentración disminuye hasta alcanzar niveles de anaerobiosis, es decir ausencia de oxígeno disuelto. Se logran valores más bajos de DQO y DBO cuando se mezclan el agua residual de fermentación con el agua residual de destilación en los que se alcanzan valores que se corresponden con los reportados por (Obregón, 2005; Valdés, 2007).

Se determinó que la vinaza de la destilería posee una alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), las cuales son muy importantes, ya que degradan el contenido de materia orgánica en la suspensión, necesarias para la obtención de biogás. También presentan gran cantidad de nitrógeno, fuente principal de alimentación de las bacterias formadoras de metano, y contribuye a la formación de nuevas células. Las características que presenta este residual es muy provechosa para ser tratada en un reactor UASB para la obtención de biogás y lodo como fertilizante, así se disminuye la contaminación ambiental y se hace un uso económico de esta en la generación de energía (González Rodríguez, 2020 #169).

3.2 Dimensionamiento del equipamiento

Etapas 1. Tratamiento preliminar.

Diseño del intercambiador de calor

El calor intercambiado entre los dos fluidos $Q = 346\,657,94$ (kcal/kg °C), corresponde al calor necesario para disminuir la temperatura del sustrato desde su temperatura de entrada (105°C) hasta la temperatura de salida (80°C).

Por lo tanto, se ha seleccionado un intercambiador de placas (Tabla 11) asumiendo un coeficiente global de transferencia de calor obtenido para el sistema es de 4 000 W/m²K. La superficie de intercambio necesaria para la transferencia del calor es de 14 m².

Tabla 11. Características del intercambiador de placas

Q (kcal/kg °C)	346 657,9
U (W/m ² K)	4 000
MLDT	6
A (m ²)	14,44
Cantidad de placas	78

Diseño de la piscina de enfriamiento.

Una vez que se estipularon los galones por minuto (234,41 gpm) que se necesitan enfriar, se localiza en las tablas la mejor opción que se puede construir según el espacio disponible (Tabla 12).

Se propone un enfriadero con 4 atomizadores por ramilletes situados a 90° en un círculo imaginario de 10 pie (3 m) de diámetro. Las medidas de las piscinas, la distribución y localización dan un 25% más de capacidad por unidad de área.

El enfriadero es cuadrado y posee un total de 3 hileras con 80 pie (24,4 m) de ancho. La distancia entre hileras y filas es de 15 pie (4,6 m) de esta manera se compensa la dificultad de circulación del aire dándole más amplitud al espacio por donde él tiene que pasar. Además, en la tabla 13 se muestran las características de las tuberías para el enfriadero.

Tabla 12. Datos para construcción del enfriadero.

Por ramillete		Atomizador		Hileras	Márgenes	
Atomizadores	Gpm	Tamaño	gpm		Extremos	Costados
4 a 90° en 10 pie (3 m) de diámetro	200	2 plg (0,05 m) y 1 5/32 pulg (0.03 m)	50	7 (2,13 m) a 15 pie (4,6 m) entre líneas	25 pie (4,6 m)	20 pie (6 m) y 30 pie (9 m)

de centro						
gpm	Cantidad Total			Taza	pie² de área ramilletes	
	Filas	Ramilletes	Atomizadores	Largo		Área
600	1	3	12	15 pie (4,6 m)	1 200 (111,5 m²)	450 (41,8 m²)
Altura (m)					6	
TRH (días)					1	
Flujo volumétrico de aguas residuales (m³/día)					1 535,88	
Volumen efectivo (útil) (m³)					1 535,88	
Volumen total (m³)					1 689,46	
Área (m²)					281,58	

Tabla 13. Datos tubería del enfriadero

Diámetro Pulgarín)	(Ruiz	gpm	Velocidad	Pérdida por fricción (pie/1000 pie)	Ramilletes a abastecer
6		600	6,7 pie/s 0,3 m/s	47	3

Diseño del tanque de alcalización con agitación (TAA)

Se ha dimensionado este tanque para un índice de consumo de 5,53 t de Ca(OH)₂/d referido al volumen requerido para alimentar al digestor (1 535,88 m³/día) con el fin de tener la suficiente capacidad de almacenamiento en caso de un problema con el digestor o cualquier otro elemento de la planta. Además, se ha previsto un borde libre en el tanque de 0,3 m, dando un volumen aproximado de tanque de 428 m³.

Se ha seleccionado el tanque de forma cilíndrica con el fin de que ocupe una menor superficie, con una altura de 6 m. Estará situado sobre una base de

concreto y se ejecutará “in situ en acero inoxidable para evitar los problemas de corrosión.

Las características que se han seleccionado para este tanque se resumen a continuación:

Tabla 14. Características del TAA

Materiales de construcción	Acero Inoxidable
Forma	Cilíndrica
t de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{d}$	5,53
m^3 vinaza/d	1 536
Flujo de entrada (m^3/d)	1 541,41
Volumen (m^3)	428
Altura (m)	6,0
Diámetro (m)	9,5
Área (m^2)	259,6

El tanque dispondrá de una entrada de sustratos, una salida de biomasa que a través de una bomba será impulsada hasta el digestor, y una descarga de arenas y/o material inorgánico que pueda haberse formado. Además, el tanque estará cubierto para evitar la entrada de aguas pluviales y la emisión de malos olores.

El piso del tanque tendrá una pendiente del 0,5% hacia la tubería de descarga de arenas. La tubería de salida hacia el digestor está ubicada 10 cm más arriba del fondo del tanque para que arenas acumuladas en el fondo no descarguen en el digestor.

Todas estas entradas y salidas deben tener instaladas sus propias llaves de paso y sus respectivos medidores de caudal. Es de vital importancia que todas estas válvulas y llaves sean de excelente calidad y no de metales dulces como el cobre o bronce que podrían generar serios problemas de corrosión.

Para realizar la mezcla (vinaza, cal) en el tanque se instalará un sistema de agitación. La potencia necesaria para la mezcla de los residuos será de 8 W/m^2 de fluido a mezclar. Por lo tanto, necesitaremos una potencia de agitación de

2,06 kW. El fluido a agitar presenta una viscosidad y densidad similar al agua. Para este tipo de fluidos la bibliografía nos recomienda el uso de agitadores tipo turbina o hélice.

Se ha seleccionado un agitador sumergido tipo hélice, principalmente diseñados para homogeneizar principalmente diseñados para homogeneizar sustratos líquidos (vinazas, purines, etc.) sus características se presentan en la tabla 15. Para evitar problemas de corrosión el material de construcción del agitador será de acero inoxidable AISI 316.

Tabla 15. Características del agitador

Potencia del motor	W/m ²	8
Área del tanque	m ²	256,90
Potencia de agitación	W	2 055,21
Potencia de agitación	kW	2,06

Etapas 2. Digestión anaerobia

Diseño del reactor anaerobio UASB.

Para el presente proyecto se ha optado por seleccionar un digestor UASB, en la tabla 17, se enumeran sus características. Los motivos principales por los que se ha tomado esta decisión son los siguientes:

- La producción de lodos estabilizados en exceso es mínima y fácilmente drenable hasta de 30 a 40 % y, por tanto, los costos de tratamiento del lodo y su transportación posterior son relativamente bajos.
- Se pueden aplicar altas cargas hidráulicas y orgánicas con eficiencias aceptables.
- El reactor necesita poco espacio.
- Los lodos anaerobios adaptados pueden mantenerse sin alimentación por largos períodos de tiempo, por lo que el proceso resulta muy adecuado para las industrias que trabajan de forma cíclica.

- Su construcción no es compleja y los costos de operación y mantenimiento son relativamente bajos.

Tabla 17. Características del reactor anaerobio

Flujo volumétrico de aguas residuales (m ³ /día)	1535,88
DQO entra al reactor (kg DQO/m ³)	48
OLR (kg/m ³ d)	9,83
Velocidad (m/s)	2,4
Volumen (m ³)	7500
Altura (m)	12
Área (m ²)	640
Considerando 4 reactores	
Área (m ²)	160
Diámetro (m)	14

Etapla 3. Disposición final del residual tratado.

Laguna terciaria

Se asume el sistema de tratamiento existente en la fábrica compuesto por 6 lagunas de oxidación cumpliendo la S función de enfriamiento.

Etapla 4. Adecuación y almacenamiento del biogás

Sistema de desulfuración

El biogás obtenido en el digestor posee un contenido en ácido sulfhídrico lo suficientemente bajo como para cumplir las necesidades del motor, pero para evitar problemas de corrosión en el sistema se ha seleccionado un sistema simple de tratamiento para la eliminación del mismo. En la tabla 19 se muestran las características de diseño

Tabla 19. Características de la columna de desulfuración

	Columna1	Columna 2
Volumen (m³)	72	31
Diámetro (m)	1,22	1,01
Área (m²)	1,17	0,80

Gasómetro

Se determinó el volumen del gasómetro dando como resultado 5 625,32 m³/d para un sobredimensionamiento del 12%. Se decide optar por seleccionar un gasómetro de membrana. Este tipo de gasómetro utiliza membranas para separar el gas producido en el reactor UASB del líquido residual. El gas se acumula en la parte superior del gasómetro y puede ser extraído y utilizado para diferentes propósitos. Se situará después de la planta de purificación de biogás, optimizando así los temas de espacio y disposición de los implementos de la planta. Este gasómetro está compuesto por una membrana exterior encargada de darle forma y por una membrana interior, que cumple con la función de cerrar herméticamente el fermentador. Un soplante de aire de apoyo en funcionamiento continuo transporta el aire en los espacios vacíos manteniendo así la presión constante independientemente de la producción y la demanda del biogás. La presión en los espacios vacíos cumple con la función de conservar la forma de la membrana exterior garantizando así que el gasómetro sea resistente a todo tipo de carga externa.

Tabla 21. Características del gasómetro

$V_{\text{gasómetro}} \text{ (m}^3\text{)}$	4687,77
$Q_p \text{ (m}^3\text{/d)}$	29299
T_c	0,33

Etapas 5. Secado y despacho de lodos

Lecho de secado de lodos

De acuerdo al criterio de (Dodane & Ronteltap, 2015) una instalación para tratamiento en lechos de secado consiste en los lechos (con sus puntos de entrada de los lodos), un sistema de drenaje y almacenamiento de los lixiviados, un lugar fuera de los lechos donde guardar los lodos secos (donde continúan su deshidratación) y posiblemente tanques de sedimentación y espesamiento. Por otro lado, un tanque de acopio o sedimentación puede ser instalado, donde llegan todos los lodos, para luego bombearlos a sus lechos correspondientes.

Se decide diseñar un lecho que recibirá lodos con una concentración de 60 gTS/L, en la cantidad de 1 551,24 m³/día, en un lugar con buenas condiciones climáticas. Se verterán los lodos de lunes a sábado, durante 52 semanas del año. En la tabla 20 se muestran las características del sistema de secado de lodos.

Tabla 20. Secado de lodos

Producción de lodos en el sedimentador (m ³ /d)	4,53
Producción de lodos en el reactor (m ³ /d) (Hermida-García et al.)	7756,18
Rendimiento del lodo (kg de lodo/m ³ vinaza)	5,05
Área superficial del lecho de secado (m ²)	3774,67
Carga total de lodo (kg/d)	1551,24
Carga superficial de lodo (kg ST/m ² año)	150,00
Ancho del lecho de secado (m)	61,44
Largo del lecho de secado (m)	61,44

3.3 Alternativas para el uso del biogás

Alternativa 1. Generación de energía eléctrica y térmica

En esta alternativa la generación de energía eléctrica y térmica a partir del biogás producido es asumido. Se estima que pueden generarse 74 536 kWh/d de energía eléctrica con cuatro unidades de cogeneración de 1 202 kW cada una

(Marca Jenbacher JMC 416 GS-BL) con 15,5 horas de servicio diario. Se abastecen los 500 kWh/d de energía eléctrica consumidos en la producción de alcohol y se consumen 12 891 kWh/d en la producción de biogás, de acuerdo a un índice de 0,44 kWh/m³ biogás reportado por ⁽¹¹⁾. La energía eléctrica sobrante de 61 144 kWh/d se puede vender, lo que proveerá beneficios a la entidad (Tabla 22).

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 calentamiento del digestor para alcanzar la temperatura óptima de 35°C en régimen mesofílico ⁽¹²⁾.

Tabla 22. Resultados obtenidos para las diferentes alternativas

Potencial	Unidad	Valor
Producción de metano	m ³ /día	17 140
Producción de biogás	m ³ /día	29 299
Índice de biogás	m ³ biogás/m ³ vinaza	19
Alternativa 1		
Energía eléctrica consumida en la producción de alcohol	kWh/d	500
Energía eléctrica consumida en producción de biogás	kWh/d	12 891
Energía eléctrica generada a partir de biogás	kWh/d	74 536
Energía eléctrica neta	kWh/d	61 144
Energía térmica recuperada	kWh/d	75 239
Potencia eléctrica	kW	4 x 1202
Tiempo de servicio diario	h	15,5
Eficiencia eléctrica (η_e)	%	42,4

Eficiencia térmica (η_t)	%	42,8
---------------------------------	---	------

Alternativa 2

Energía Térmica consumida en la producción de alcohol	kWh/d	300 927
Energía térmica generada	kWh/d	175 967
% Fuel oil que se reemplaza con biogás	%	58
Consumo fuel oil	L/d	23 535
Cantidad de fuel oil que se ahorra	L/d	1 376 208

Alternativa 3

Cantidad de biogás para viviendas y comedor de la escuela	m ³ /d	2018
Cantidad de biogás para comedores de la empresa	m ³ /d	148
Cantidad de biogás sobrante	m ³ /d	27 132

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 (6 282 t/año= 6,4 millones L/año). De acuerdo a una producción de biogás estimada de 29 299 m³/d, se podría reemplazar parcialmente (58%) el fuel consumido para la generación de vapor en la caldera de la destilería (Tabla 22). Se ahorrarían 1 376 208 L/d (371 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 SO₂ y la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) es mínima, solamente existe la emisión de CO₂, 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 2 166 m³/d para suplir las necesidades de combustible doméstico con biogás. El 93,2% de este consumo sería para las viviendas de la comunidad, mientras que los comedores de la empresa solo consumen del 6,8%. Existe un sobrante de 27 132 m³/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 el subepígrafe a continuación.

3.4 Evaluación económica y análisis de alternativas

En la tabla 23 se presenta el desglose del costo de inversión de las alternativas A1-A3 para una planta de biogás a partir de las vinazas generadas en la producción de alcohol.

Tabla 23. Desglose del costo total de inversión para las alternativas de estudio.

Costo de Inversión	A-1	A-2	A-3
Volumen del reactor (m ³)	7 500	7 500	7 500
Equipamiento planta de biogás (\$)	1 846 900,58	1 846 900,58	1 846 900,58
Equipamiento pretratamiento (\$)	78 013,03	78 013,03	78 013,03
Equipamiento para Grupo Electrónico (\$)	2 320 000		
Quemador caldera (\$)		653 809,27	653 809,27
Accesorios y equipamiento red (\$)			418 063,75
Adquisición de equipamiento (\$)	4 913,607	244 2 722,877	578 2 786,627
Costo directo total (\$)	6 409 819,55	3 893 871,54	4 441 535,06
Costo total indirecto (\$)	488 622,42	362 825,02	390 208,19
Capital total invertido (\$)	7 563 021,08	4 594 424,59	5 241 726,63

La alternativa A1 tuvo el mayor capital total invertido con 7,6 millones de pesos, debido a que es la de mayor capacidad instalada (1 266 kW). Sin embargo, al

ser la alternativa de mayor ingreso con 1,6 millones de pesos anuales, obtuvo un flujo de caja anual de \$ 743 327,08. La mayor contribución en los ingresos fue para la venta de electricidad (Tabla 24).

Tabla 24. Ingresos, costos de producción y flujo de caja

	A-1	A-2	A-3
Conceptos			
Desembolso inicial	7 478 122,81	4 594 424,59	5 241 726,63
Ingresos	1 635 206,51	1 422 191,82	1 429 422,48
Venta electricidad	1 372 908,09	0,00	0,00
Ahorro petróleo	0,00	1 159 893,41	1 167 124,06
Créditos de CO2	121 637,79	121 637,79	121 637,79
Venta de fertilizante/agua riego	140 660,63	140 660,63	140 660,63
(-) Costos de producción			
Costos Directos			
Agua	60 475,15	60 475,15	60 475,15
Cal	323 916,45	323 916,45	323 916,45
Electricidad	453 262,21	453 262,21	453 262,21
Mantenimiento	14 956,25	9 188,85	9 188,85
Mano de Obra	28 800,00	28 800,00	28 800,00
Costos Fijos			
Seguros	2 991,25	1 837,77	2 096,69
Impuestos	7 478,12	4 594,42	5 241,73
C. Total de producción	891 879,43	882 074,85	882 981,08
(=) Flujo de Caja	743 327,08	540 116,97	284 142,98

Una comparación del ingreso obtenido y emisiones evitadas de CO₂eq. para las cuatro alternativas propuestas (A1, A2, A3-A1, A3-A2) es resumida en la Tabla 25. 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.

Tabla 25. Comparación de alternativas por ingreso y emisiones evitadas de CO₂eq.

	Portador que se sustituye	Ahorro anual	%	Ahorro (MMCUP/año)	Ahorro (MUSD/año)	Emisiones evitadas (t CO ₂ eq/año)
A1	Electricidad	500 kWh	100	1,3	1 071,6	14 319,84
A2	Fuel oil	3 267 t	58	40,8	1 159,8	9,30
A3-A1	Electricidad	500 kWh	100	1,3	1 190,1	12 418,1
A3-A2	Electricidad/ Fuel oil	2 952 t	47	32,2	1 167,1	1 241,3

Precios en CUP (UEB Derivados Melanio Hernández): Fuel oil:10,69 CUP/L, Electricidad: 9,7626 CUP/kWh. Precios en USD e índices (Trincado, 2024): Fuel oil ponderado para calderas: 355 USD/t, Fuel oil ponderado: 292 USD/t, CO₂ evitado: 0,8674 t CO₂eq/MWh, 0,002481869 t CO₂/t fuel oil.

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 40,8 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, el sustituir las importaciones de fuel oil por un valor de 1 330 629 USD al año. Otro aspecto importante es que la inversión para la caldera sería 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.

Este análisis se confirma con el cálculo de los indicadores dinámicos del Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión (PRD), para lo cual se utilizaron los datos de inversión y costos operacionales publicados (Alba, 2023). Para la red de biogás (Alternativa 3) se estimó una inversión de 418 063,75 USD, de acuerdo a datos reportados. Como se observa en la Tabla 26 la alternativa A1 no fue factible económicamente, ni considerando en los ingresos la venta de bonos de CO₂ en el mercado voluntario a un precio de 8 USD/t (A1-CO₂), aunque un mejor valor lo ofrece el mercado regulado con 59,64 USD/t (SENDECO2, 2024). La alternativa A2 fue factible económicamente con valores del VAN>0, TIR>12% y PRD de 7 años (sin venta de bonos de CO₂, A2), y de 5,6 años cuando se considera la venta de bonos de CO₂ (A2-CO₂). La combinación de A2-A3 fue factible económicamente, pero con un PRD superior a A2.

Tabla 26. Indicadores dinámicos de la inversión para las alternativas A1 y A2.

	VAN	TIR	PRD
A1	-\$1,325,194.39	7%	>15 años
A1-CO ₂	-\$617,632.33	10%	>15 años
A2	\$1,079,020.57	19%	7,0 años
A2-CO ₂	\$1,786,582.63	23%	5,6 años
A1-A3	-\$4,096,078.75	2%	>15 años
A1-A3- CO ₂	-\$3,388,516.69	4%	>15 años
A2-A3	\$961,038.96	17%	9,1 años
A2-A3- CO ₂	\$1,668,601.02	20%	7,0 años

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

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 CO₂ con 11 176 t CO₂eq al año.

3.5 Evaluación ambiental de la planta de biogás

Análisis del ICV

El inventario de datos primarios se muestra en el anexo 3, mostrando la cantidad de recursos tomados de la ecosfera y la tecnosfera, los productos y las emisiones al aire, el agua y suelo. Estos datos se utilizaron para la evaluación de ambos escenarios.

Evaluación de impacto del ciclo de vida (LCA)

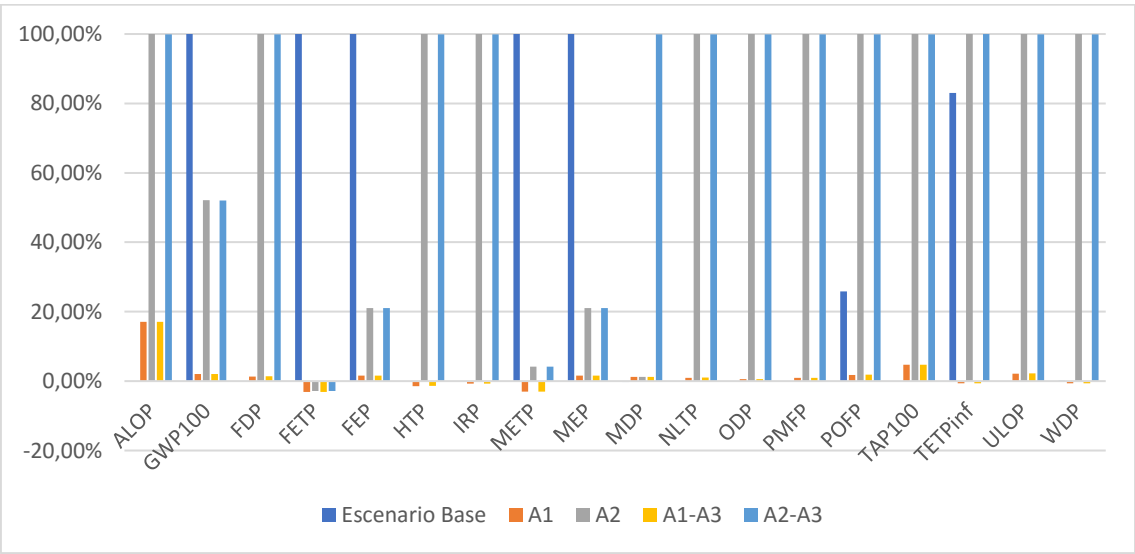


Figura 3. Comportamiento de las categorías de impacto para cada alternativa evaluada

Como se demuestra en la Figura 3 el escenario A1 y A1-A3 representan los más respetuosos con el medio ambiente en todas las categorías de impacto excepto en ALOP, FDP, TETP, GWP100, MDP, NLTP, ODP, PMPP, POFP, TAP y ULOP en comparación con escenario base, A2 y A2-A3. Además, mostró el mejor

comportamiento ambiental beneficioso (valores negativos) en FETP, METP, HTP, IRP, y WDP.

Producto del enriquecimiento de nutrientes, la eutrofización y la acidificación terrestre, son las categorías asociadas principalmente al enriquecimiento de contaminantes, por lo que van a afectar particularmente a la FEP y MEP. Los escenarios analizados obtienen productos con nutrientes que pudieran sustituir fertilizantes, aunque en menor concentración debido a la volatilización del N durante el proceso (Hassanein et al., 2022) y la sustitución de diésel y combustibles fósiles por la generación de energía eléctrica y térmica para el consumo en la empresa (Kacprzak et al., 2023).

La sustitución de fertilizantes tuvo la contribución beneficiosa en todas las categorías de impacto, lo que indica que la sustitución de vectores energéticos por una fuente de energía de base renovable es más respetuosa con el medio ambiente. La aplicación en tierra de digestato evita la producción y aplicación de fertilizantes minerales industriales de N, P y K. La cantidad de fertilizante mineral que se evita está relacionada con el contenido de nutrientes en el digestato (N, P y K) y su disponibilidad para las plantas en comparación con la que se consigue con los fertilizantes minerales (Aragón-Briceño et al., 2021; Bala et al., 2021).

A1 y A1-A3 son las alternativas más recomendables desde una perspectiva ambiental, proporcionando mayores reducciones en emisiones de CO₂ y otros beneficios ambientales. Sin embargo, la decisión final debe equilibrar los aspectos económicos, sociales y técnicos.

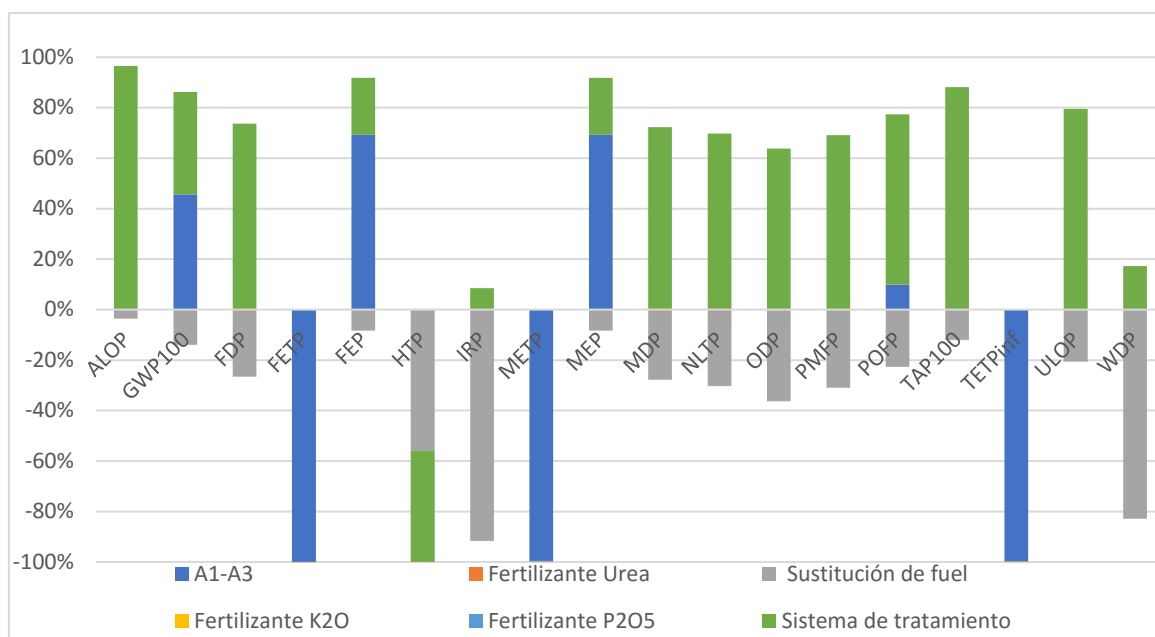


Figura 4. Contribución de los resultados ambientales de las actividades estudiadas

Producto del mejor comportamiento en la A1- A3 para el proceso de tratamiento de la vinaza, se analizaron los flujos que tienen lugar en el proceso para determinar la contribución de cada uno. En todas las categorías de impacto, las cargas medioambientales totales relativas a la A1-A3 se consideran perjudiciales (Figura 4). Las categorías de impacto más afectadas son ALOP, TAP, y ULOP, con contribuciones que oscilan entre el 95% y el 99% del impacto total. En cuanto a la sustitución de productos, se mostraron impactos beneficiosos en las categorías de impacto en GWP y HTP.

A pesar de los beneficios ambientales, la implementación de estas alternativas debe considerar los costos y la infraestructura necesaria para la generación de biogás y su utilización efectiva.

Conclusiones parciales

1. A partir de las tecnologías y etapas propuestas se obtuvo una producción de biogás de 29 299 m³/d, que puede ser utilizada para la sustitución de fuel oil y electricidad.

2. El empleo del biogás en la sustitución del fuel oil en la caldera de la destilería es la alternativa más atractiva desde el punto de vista económico, obteniéndose un beneficio anual de 40,8 millones CUP para la empresa y de 1159,8 miles USD para el país.
3. Se obtuvo que la alternativa con mejor impacto ambiental fue la que emplea el biogás para la cogeneración con grupo electrógeno y para la cocción de alimentos (A1-A3).

CONCLUSIONES

1. Se diseñó una planta para la producción de biogás a partir de las vinazas generadas en la producción de alcohol de la destilería Melanio Hernández basada en cinco etapas: Tratamiento preliminar, Digestión anaerobia, Disposición final del residual tratado, Adecuación y almacenamiento del biogás y Secado y despacho de lodos.
2. Se estimó una producción de biogás de 29 299 m³/d, la cual puede utilizarse para reemplazar un 58% del fuel oil consumido en la generación de vapor, o suplir 500 kWh/d de electricidad del proceso de producción de alcohol y vender 61 144 kWh/d al sistema electroenergético nacional.
3. La aplicación del biogás para remplazar 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 40,8 millones CUP para la empresa y de 1159,8 miles 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 CO₂. 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.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar otras tecnologías de digestión anaerobia a partir de vinazas de destilería.
2. Añadir un análisis de sensibilidad a la valoración económica realizada.
3. Profundizar en el inventario de ACV.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 14040, N.-I. (2009). Gestión Ambiental-Análisis de Ciclo de Vida-Principios y Marco de Referencia (ISO 14040:2006, IDT). (Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.)
- 14044, N.-I. (2009). Gestión Ambiental-Análisis de Ciclo de Vida-Requisitos y Directrices (ISO 14044: 2006, IDT). (Oficina Nacional de Normalización. Cuba.)
- Alba-Reyes, Y., Hermida-García, F. O., Pedraza-Garciga, J., López-González, L. M., Espinosa-Negrín, A. M., Carbonell-Sorí, L., & Barrera, E. L. (2024). 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*, 434, 140288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140288>
- Anukam, A., Mohammadi, A., Naqvi, M., & Granström, K. (2019). A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency. *Processes*, 7(8), 504. <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/8/504>
- Arruda, B. G., Costa, R. B., Zaiat, M., & Braga, A. F. M. (2023). Biogas production from fermented sugarcane vinasse: impact of trace elements supplementation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05036-5>
- BARRERA-CARDOSO, E. L., CARABEO-PÉREZ, A., ODALES-BERNAL, L., CONTRERAS-VELÁZQUEZ, L. M., & LÓPEZ-GONZÁLEZ, L. (2018). Sistematización de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala industrial. *Tecnología Química*, 38(1), 29-45.
- Barrera, E. L., Rosa, E., Spanjers, H., Romero, O., De Meester, S., & Dewulf, J. (2016). A comparative assessment of anaerobic digestion power plants as alternative to lagoons for vinasse treatment: life cycle assessment and

exergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 113, 459-471.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.095>

Barrera, E. L., Spanjers, H., Dewulf, J., Romero, O., & Rosa, E. (2013). The sulfur chain in biogas production from sulfate-rich liquid substrates: a review on dynamic modeling with vinasse as model substrate *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, 88(8), 1405–1420.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/JCTB.4071>

Barrera, E. L., Spanjers, H., Romero, O., Rosa, E., & Dewulf, J. (2014). Characterization of the sulfate reduction process in the anaerobic digestion of a very high strength and sulfate rich vinasse. *Chemical Engineering Journal*, 248, 383-393.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.057>

Barros, V. G. d., Duda, R. M., & Oliveira, R. A. d. (2016). Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic sludge blanket reactors inoculated with granular sludge. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47.

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., Sanders, W., Siegrist, H., & Vavilin, V. (2002). The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45(10), 65-73.

Bergmann, J., Trichez, D., Sallet, L., Silva, F., & Almeida, J. (2018). Technological Advancements in 1G Ethanol Production and Recovery of By-Products Based on the Biorefinery Concept. In (pp. 73-95).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804534-3.00004-5>

Borrero-Neninger, J. C., Oliva-Merencio, D., & Arzola-Ruiz, J. (2023). Diseño de planta para la codigestión anaerobia de residuales vinaza-cachaza de la industria azucarera. *Minería y Geología*, 39(4), 252-266.

Botero, L., Zambrano, J. L., Oliveros, C., León, D., Sarcos, M., & Martínez, M. (2002). Calidad microbiológica del agua de un sistema de lagunas de estabilización a ser empleada en irrigación. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19, 312-323.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182002000400007&nrm=iso

Cabrera Díaz, A., Pereda Reyes, I., Oliva Merencio, D., Lebrero, R., & Zaiat, M. (2017). Anaerobic Digestion of Sugarcane Vinasse Through a Methanogenic UASB Reactor Followed by a Packed Bed Reactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 183. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2488-2>

Choi, G., Kim, H., & Lee, C. (2021). Long-term monitoring of a thermal hydrolysis-anaerobic co-digestion plant treating high-strength organic wastes: Process performance and microbial community dynamics. *Bioresource Technology*, 319, 124138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124138>

Contreras, A. M. (2007). Metodología para el análisis del ciclo de vida combinado con el análisis energético en la industria azucarera cubana. [Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas., Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas]. Cuba.

Cruz Llerena, A., Pérez Ones, O., Zumalacárregui de Cárdenas, L., & Pérez de los Ríos, J. L. (2021). Integración energética del proceso de incineración de vinazas concentradas y generación de electricidad. *Revista Universidad y Sociedad*, 13, 286-294. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000600286&nrm=iso

CUBAENERGÍA. (2021). Bioenergía, otra alternativa en el cambio sostenible de la matriz energética cubana. *Clips de Energía*, 7. www.cubaenergía.cu

da Silva, L., Moreira, R., Pinto, T., Vanderlei, M., Athayde, D., Lopes, L. F., Ogura, A., Yoshii, M., Freitas, J., Montagner, C., Goulart, B., Schiesari, L., Daam, M., & Espíndola, E. (2021). Lethal and sublethal toxicity of pesticides and vinasse used in sugarcane cultivation to *Ceriodaphnia silvestrii* (Crustacea: Cladocera). *Aquatic Toxicology*, 241, 106017. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.106017>

- Da Silva, M., Griebeler, N., & Borges, L. (2007). Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000100014>
- De Carvalho, J., Vandenberghe, L., Sydney, E., Karp, S., Magalhaes, A., Martínez Burgos, W., Medeiros, A., Thomaz-Soccol, V., Vieira, S., Letti, L., Rodrigues, C., Woiciechowski, A., & Soccol, C. (2023). fermentation Review Biomethane Production from Sugarcane Vinasse in a Circular Economy: Developments and Innovations. 9, 349. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040349>
- dos Reis, C., Carosia, M., Sakamoto, I., Varesche, M., & Silva, E. (2015). Evaluation of hydrogen and methane production from sugarcane vinasse in an anaerobic fluidized bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.136>
- España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J. O., Barahona-Pérez, L., Maldonado, J., Hernandez-Zarate, G., & Alzate-Gaviria, L. (2011). Vinasses: Characterization and treatments. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 29, 1235-1250. <https://doi.org/10.1177/0734242X10387313>
- Formann, S., Hahn, A., Janke, L., Stinner, W., Sträuber, H., Logroño, W., & Nikolausz, M. (2020). Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities Through Sugarcane Residues [Review]. *Frontiers in Energy Research*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.579577>
- Fuentes-Cruz, L., Pérez-Ones, O., Cárdenas, L. Z.-d., & Ríos, J. L. P.-d. I. (2023). Evaluación del sistema de tratamiento de residuales de una ronera cubana. *Icidca sobre los derivados de la caña de azúcar* 57(2).
- Fuess, L., Garcia, M., & Zaiat, M. (2018). Seasonal characterization of sugarcane vinasse: Assessing environmental impacts from fertirrigation and the

bioenergy recovery potential through biodigestion. The Science of the total environment, 634, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.326>

Fuess, L. T., Lens, P. N. L., Garcia, M. L., & Zaiat, M. (2022). Exploring Potentials for Bioresource and Bioenergy Recovery from Vinasse, the “New” Protagonist in Brazilian Sugarcane Biorefineries. Biomass, 2(4), 374-411. <https://www.mdpi.com/2673-8783/2/4/25>

González, L. M. L. (1999). Alternativas para el tratamiento del residual de la destilería Paraíso [TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE MASTER EN ANALISIS DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA QUIMICA., Universidad Central Marta Abreu de las Villas]. Santa Clara.

González, L. M. L. (2016). ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA (PML) PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON FINES ENERGÉTICOS EN UNA EMPRESA AZUCARERA DIVERSIFICADA [Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. , Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas]. Sancti Spíritus.

González Rodríguez, S., González Curbelo, G., González Silva, G., & Árias Lafargue, T. (2020). Aprovechamiento de la potencialidad de la vinaza para la producción de biogás como energía renovable. Tecnología Química, 40, 269-287. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000200269&nrm=iso

Guarenghi, M., Garofalo, D., Seabra, J., Moreira, M., Novaes, R., Ramos, N., Nogueira, S., & Andrade, C. (2023). Land Use Change Net Removals Associated with Sugarcane in Brazil. Land, 12, 584. <https://doi.org/10.3390/land12030584>

Guasumba, S., Tafur Escanta, P., Tipanluisa, L., Ocaña, E., & Pérez Rosales, J. (2019). Producción eficiente de biogás mediante calentamiento del sustrato con energía solar térmica de baja temperatura. Científica, 23(1), 3-12.

Hermida-García, F., Barrera, E., Alba Reyes, Y., López González, L. M., Pedraza, J., & Alvarez Guerra Plasencia, M. (2020). Impacto de la producción de biogás en la matriz energética de la granja porcina Guayos. 12, 254-262.

Hermida García, O. (2023). In.

Hernández, U. M. (2024). Tarifa de precios de productos. . In: Contabilidad y Finanzas.

Ibarra-Camacho, R., León-Duharte, L., & Osoria-Leyva, A. (2019). Caracterización fisico-química de vinazas de destilerías. Revista Cubana de Química, 31, 246-257.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000200246&nrm=iso

IBEROSPEC. (2024). La digestión anaerobia: Un proceso esencial en el tratamiento de aguas residuales. Blog Digestión
<https://iberospec.com/blog/la-digestion-anaerobia-un-proceso-esencial-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>

IRENA. (2023). World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency 1. www.irena.org/publications

Jiménez, E. V., Carmouse, M. M., Rojas, O. V., Pérez, O. L. L., Llanes, S. D., Abreu, M. C. O., Rodríguez, R. V., & Bonachea, O. P. (2004). Tratamiento combinado de las vinazas de destilería y residuales azucareros en reactores UASB. Tecnología del agua, 24(249), 78-85.

Jiménez, G. A. A. (2023). Producción de biogás por digestión anaeróbica a partir de vinaza y estiércol vacuno a escala laboratorio [Optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química, UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA].

Kalyuzhnyi, S., & Fedorovich, V. (1998). Mathematical modelling of competition between sulphate reduction and methanogenesis in anaerobic reactors. Bioresource Technology, 65(3), 227-242.

- Lohani, S. P., & Havukainen, J. (2018). Anaerobic Digestion: Factors Affecting Anaerobic Digestion Process. In S. J. Varjani, E. Gnansounou, B. Gurunathan, D. Pant, & Z. A. Zakaria (Eds.), *Waste Bioremediation* (pp. 343-359). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_18
- López-Savran, A., & Suárez-Hernández, J. (2018). Experiencia de suministro de biogás en una comunidad rural, en Cuba*. *Pastos y Forrajes*, 41, 73-79. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942018000100010&nrm=iso
- Mamani, J., Llumipanta, F., Ramos, S., Rea, J., Alucho, J., Saltos, D., Llanos, F., & Jácome, C. (2021). Sistemas de producción de biogás: fundamento, técnicas de mejora, ventajas y desventajas. *Agroindustrial Science*, 11(2), 239-247. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.02.14>
- Mikucka, W., & Zielińska, M. (2020). Distillery Stillage: Characteristics, Treatment, and Valorization. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 192, 770–793. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12010-020-03343-5>
- Montiel-Rosales, A., Montalvo-Romero, N., García-Santamaría, L. E., Sandoval-Herazo, L. C., Bautista-Santos, H., & Fernández-Lambert, G. (2022). Post-Industrial Use of Sugarcane Ethanol Vinasse: A Systematic Review. *Sustainability*, 14(18), 11635. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11635>
- Obileke, K., Nwokolo, N., Makaka, G., Mukumba, P., & Onyeaka, H. (2021). Anaerobic digestion: Technology for biogas production as a source of renewable energy—A review. *Energy & Environment*, 32(2), 191-225. <https://doi.org/10.1177/0958305x20923117>
- Oliva Merencio, D., & Pereda Reyes, I. (2022). Biogás y sostenibilidad en Cuba. *Revista Universidad y Sociedad*, 14, 597-609. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202022000200597&nrm=iso

- Oliveira, B., Carvalho, J., Cerri, C. E., Cerri, C., & Feigl, B. (2013). Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. *Geoderma*, 200–201, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.005>
- Ospina León, L. J., Manotas-Duque, D., & Ramírez-Malule, H. (2023). Desafíos y oportunidades de la Vinaza de caña de azúcar. Un análisis bibliométrico. *Ingeniería y competitividad*, 25. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332023000100025&nrm=iso
- Parsaee, M., Kiani Deh Kiani, M., & Karimi, K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*, 122, 117-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>
- Pazuch, F. A., Nogueira, C. E. C., Souza, S. N. M., Micuanski, V. C., & L. Friedrich, A. M. L. (2017). Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná. *Renew. Sustain. Energy* 76(34).
- PCC. (2021). Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el período 2021-2026.
- Peters, M., Timmerhaus, K., & West, R. (1991). Cost estimation. *Plant design and economics for chemical engineers*, 150-215.
- Prasad, M. N. V., & Shih, K. (2016). *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*.
- Reis, C., Bento, H., Alves, T., Carvalho, A., & Castro, H. (2019). Vinasse Treatment within the Sugarcane-Ethanol Industry Using Ozone Combined with Anaerobic and Aerobic Microbial Processes. *Environments*, 6, 5. <https://doi.org/10.3390/environments6010005>
- Reis, C., & Hu, B. (2017). Vinasse from Sugarcane Ethanol Production: Better Treatment or Better Utilization? *Frontiers in Energy Research*, 5, 7. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00007>

- Rodríguez-Suárez, N., Quesada-González, O., Machado-García, R., Cantos-Macías, M. Á., & Suárez-Salazar, D. (2023). Evaluación de la vinaza de destilería de la UEB "Arquímedes Colina" para la síntesis de materiales carbonosos [Artículo Original]. *Revista Cubana de Química*, 35(1), 125-140.
- Roudbali, M., far, N. J. z. h., & Abtahi, M. (2015). Study origin, use and effects of vinasse. *Environmental Science and Engineering-iran*.
- Ruiz Pulgarín, J. A. (2024). Implementación de la recirculación del biol en la digestión anaerobia del estiércol avícola [Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Universidad de Antioquia]. Medellín, Antioquia, Colombia
- Rustiana, Y., Rieke, Y., & Nanik Indah, S. (2021). Biogas Production From Sugarcane Vinasse: A Review. *Journal of Industrial Pollution Prevention Technology*, 12(2), 34-44. <https://doi.org/10.21771/jrtppi.2021.v12.no2.p34-44>
- Safley Jr, L., & Westerman, P. (1988). Biogas production from anaerobic lagoons. *Biological Wastes*, 23(3), 181-193.
- Salazar Rodríguez, M. M. (2013). Alternativas para elevar la eficacia en el suministro y utilización del agua en la Unidad Empresarial de Base (UEB) Derivados "Paraíso" [Maestría de ingeniería hidráulica y ambiental, INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA; UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS "JOSÉ MARTÍ PÉREZ"].
- Santos, S., Rosa, P., Sakamoto, I., Varesche, M., & Silva, E. (2014). Hydrogen production from diluted and raw sugarcane vinasse under thermophilic anaerobic conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 9599–9610. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.104>
- Silva, A. F. R., Brasil, Y. L., Koch, K., & Amaral, M. C. S. (2021). Resource recovery from sugarcane vinasse by anaerobic digestion – A review. *Journal of Environmental Management*, 295, 113137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113137>

- Syaichurrozi, I. (2016). Review – Biogas Technology to Treat Bioethanol Vinasse. *Waste Technology*, 4. <https://doi.org/10.12777/wastech.4.1.16-23>
- Tricado Pacheco, J. E. (2024). Factores de conversión, equivalencias y datos para cálculos de potenciales de ahorro. .
- Uddin, M. M., & Wright, M. M. (2023). Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. *Physical Sciences Reviews*, 8(9), 2819-2837. <https://doi.org/doi:10.1515/psr-2021-0068>
- Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Biriș, S.-Ș. (2022). Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing. *Sustainability*, 14(17), 11089. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/11089>
- Zielińska, M., Bułkowska, K., & Mikucka, W. (2021). Valorization of Distillery Stillage for Bioenergy Production: A Review. *Energies*, 14(21), 7235. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/21/7235>
- Zorg-biogás. (2024). Catálogo-de-equipos/generadores/generador-de-biogás. Retrieved Consultado 1 de marzo de 2024 from <https://zorg-biogás.com>
- Aragón-Briceño, C. I. Pozarlik, A. K. Bramer, E. A. Niedzwiecki, Lukasz Pawlak-Kruczek, y H. Brem, G. (2021). Hydrothermal carbonization of wet biomass from nitrogen and phosphorus approach: A review. *Renewable Energy*, 171, 401-415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.109>
- Avalos Ramirez, A., Godbout, S., y Léveillé, F. (2012). *J Chem Technol Biotechnol.*, 87(6), 831. null
- Bala, A., Raugei, M., Teixeira, C. A., Fernández, A., Pan-Montojo, F., y Fullana-i-Palmer, P. (2021). Assessing the Environmental Performance of Municipal Solid Waste Collection: A New Predictive LCA Model. *SUSTAINABILITY*, 13(11).
- Dhaouadi, F., Sellaoui, L., Hernandez-Hernandez, L. E., Bonilla-Petriciolet, A., Mendoza-Castillo, D. I., Reynel-Avila, H. E., . . . Ben Lamine, A. (2021). Preparation of an avocado seed hydrochar and its application as heavy

metal adsorbent: Properties and advanced statistical physics modeling. Chemical Engineering Journal, 419, Article 129472. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129472>

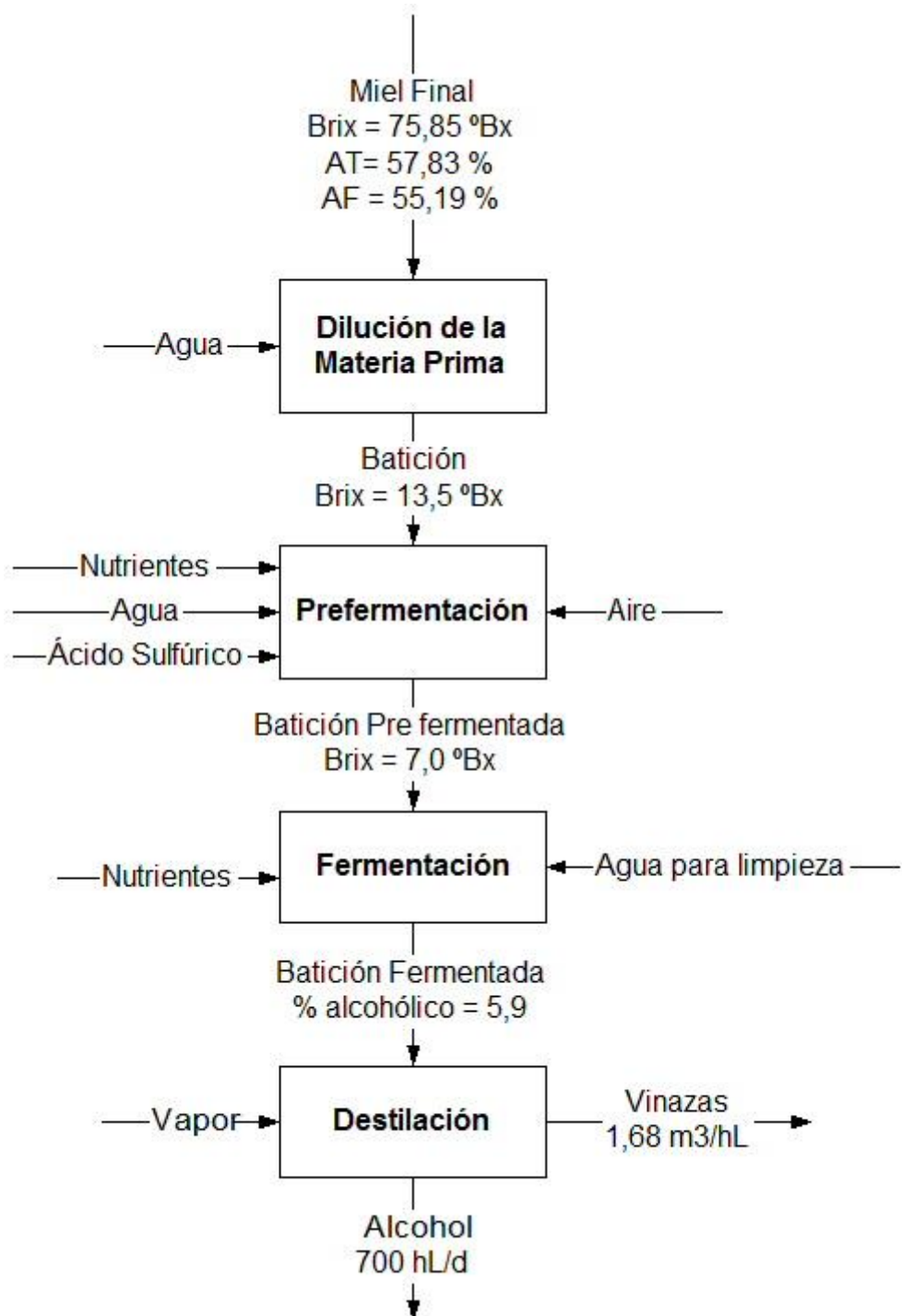
Hassanein, A., Moss, A., Cloyd, N., y Lansing, S. (2022). Evaluation and life cycle assessment of a poultry litter anaerobic digester with nutrient capture. Bioresource Technology Reports, 19, 101186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101186>

Kacprzak, M., Malińska, K., Grosser, A., Sobik-Szołtysek, J., Wystalska, K., Drózdź, D., . . . Meers, E. (2023). Cycles of carbon, nitrogen and phosphorus in poultry manure management technologies – environmental aspects. CRITICAL REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 53(8), 914-938. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2096983>

Zheng, X., Yang, Z., Xu, X., Shi, X., Dai, M., y Guo, R. (2018). Distillers' grains anaerobic digestion residue biochar used for ammonium sorption and its effect on ammonium leaching from an Ultisol [Article]. Environmental Science and Pollution Research, 25(15), 14563-14574. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1681-3>

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de producción de alcohol



Anexo 2. Diagrama del proceso de producción de biogás.

