

PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA A PARTIR DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE VINAZAS DE DESTILERÍAS EN REACTORES UASB

BIO-POWER GENERATION FROM ANAEROBIC TREATMENT OF DISTILLERIES VINASSES IN UASB REACTORS

Yaniris Lorenzo Acosta^{1}, Fidel Domenech López¹, Mariela Gallardo Capote¹,
Lixis Rojas Sariol¹, Felipe Eng Sánchez¹, Juana Chanfón¹ y Roxana Fernández¹*

¹ Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Vía Blanca 804 y Carretera Central. S.M.P. La Habana, Cuba.

Recibido: Marzo 17, 2014; Revisado: Junio 2, 2014; Aceptado: Julio 7, 2014

RESUMEN

Los procesos de digestión anaeróbicos son muy utilizados para el tratamiento de residuales, por lo que presentamos sus ventajas y desventajas, así como el tratamiento del efluente más agresivo de la industria alcohólica (vinazas de destilerías) en reactores anaerobios *UASB* (reactores de cama de lodo de flujo ascendente); que por un lado trata biológicamente el residual y se produce un biocombustible, como vía para atenuar dos grandes problemas: la contaminación de aguas y la insuficiencia de energía. De esta manera los objetivos del trabajo son: brindar una panorámica sobre las ventajas y aplicabilidad del tratamiento anaeróbico de vinazas de destilerías en reactores *UASB* para la producción de biogás, con fines energéticos, y demostrar la viabilidad económica de la tecnología de producción de biogás para su conversión en energía eléctrica. Para demostrar la viabilidad técnico-económica se presenta un caso de estudio donde se tratan 800 m³/d de vinazas y se producen 13 070 m³ de biogás/d, para una generación diaria de electricidad de 22 220 kWh y 4,70 t/d de lodo fertilizante. La factibilidad económica se evalúa utilizando el software “COMFAR III EXPERT” aplicando a la venta de los certificados de reducción de emisiones (CERs), según protocolo de Kioto. Los resultados evidencian la factibilidad con un VAN al 10% de 4325947,14 USD, una TIR del 22,57 y un período de recuperación de 5,77 años; siendo las materias primas las que más inciden en los costos unitarios de 0,39 Moneda Total/m³ de biogás.

Copyright © 2014. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Yaniris Lorenzo, Email: yaniris.lorenzo@icidca.edu.cu

Palabras clave: Tratamiento de vinazas de destilerías, digestión anaerobia, producción de bioenergía, biogás, reactores UASB, estudio de prefactibilidad

ABSTRACT

Anaerobic digestion processes are widely used for wastewater treatment, so we show their advantages and disadvantages as well as the treatment of the most aggressive effluents from alcohol industry (distillery vinasses) in anaerobic UASB reactor (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket), which treats the residual biologically in one side, and produces biofuel as a way to overcome two major problems: water pollution and energy failure. In this way, the work objectives are: to provide an overview of the advantages and applicability of anaerobic treatment of distilleries vinasses in UASB reactors for biogas production with energy purposes, and to demonstrate the economic viability of the biogas production technology to convert it into electrical power. The paper performs a study case in order to demonstrate the economic viability where 800 m³/d of vinasses are treated and 13 070 m³ of biogas/d are produced, for a daily electricity generation of 22 220 kW and 4, 70 t/d of fertilizer sludge. The economic feasibility is evaluated using the economic analysis software "COMFAR III EXPERT" applied to the sales of certified emission reductions (CERs) according to Kyoto Protocol. The results show the feasibility with an NPV to 10% of \$ 4325947,14, an IRR of 22,57 and a recovery period of 5,77 years, being the costs of raw materials the most affecting on the unit costs of 0,39 Total Currency/m³ of biogas.

Key words: Distillery vinasse treatment, anaerobic digestion, bioenergy production, biogas, UASB reactors, prefeasibility study.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy día la humanidad, permanece castigada por la aguda insuficiencia de fuentes de energía y el deterioro acelerado del medio ambiente. El gran reto es resolver estas amenazas al mismo tiempo, sin comprometer las próximas generaciones. Para ello se hace necesario encontrar fuentes alternativas de combustibles ecológicamente atractivas, lo cual requiere del diseño de una tecnología apropiada económica y tecnológicamente.

Las vías microbiológicas de producción de energía (biogás) a partir de sustratos biológicamente degradables, por digestión anaerobia, representan una excelente alternativa para la sustitución de combustibles fósiles no renovables que se utilizan en la actualidad, a la vez que ofrece soluciones eficientes que dan respuesta a la contaminación de las aguas residuales (Lettinga and Hulshoff, 1991; Wesley y Barbosa, 2000). Esto es especialmente interesante dentro del campo de las instalaciones agroindustriales las que pueden cubrir una parte de sus necesidades energéticas a partir de sus propios residuales, para complementar o reemplazar los combustibles fósiles (Lettinga and Hulshoff, 1991; Lorenzo, 2008; Wesley y Barbosa, 2000). De esta forma el tratamiento de vinazas de destilería por digestión anaerobia para la producción de biogás, es una alternativa prometedora para el tratamiento del residual más agresivo de la industria sucroalcoholera cubana, residuales que en las 11 destilerías del grupo

empresarial AZCUBA, no son suficientemente gestionados, incumpliendo las normativas de vertimiento vigentes (NC 27: 2012; NC 521: 2007). En este sentido, el sector azucarero cubano es catalogado como el de mayor impacto en términos de contaminación de residuales líquidos (NC 27: 2012), por los grandes volúmenes de vinaza que generan cada año, a lo largo de toda la isla (10500 m³/d).

Los reactores más empleados a escala industrial para el tratamiento de efluentes líquidos por digestión anaerobia son los reactores anaerobios de cama de lodo de flujo ascendente, o Up Flow Anaerobic Sludge Blanket conocido por sus siglas en inglés como (*UASB reactor*), los cuales fueron desarrollados en Holanda en los años 70' por Lettinga and Hulshoff (1991). La aplicabilidad de estos reactores se basa en la posibilidad de tratar efluentes líquidos de muy alta carga orgánica a cortos tiempos de retención con eficiencias de hasta 90%. La introducción de esta tecnología a escala industrial se basa además en los bajos costos de construcción, producción y mantenimiento (Pérez y col., 2000; Menéndez y Pérez Olmo, 2007; Lorenzo, 2008), por lo que fueron muy utilizados desde los años 80' en países tropicales para el tratamiento del residual más agresivo de la industria sucroalcoholera: las vinazas o mostos de destilerías.

Brasil, uno de los más grandes productores de etanol, fue el país pionero en aplicar, a nivel industrial, la tecnología holandesa para el tratamiento anaerobio de estos residuales (Wesley y Barbosa, 2000; Weiland, 2010; Terry, 2012). En el escenario cubano con 16 destilerías, de las cuales 11 pertenecen al grupo azucarero Azcuba, solo existe una planta industrial que trata por digestión anaerobia en reactores UASB vinaza de destilería y el biogás producido solo es utilizado para generar vapor y para la cocción de alimentos, resultados que no se han publicado hasta estos momentos.

De esta manera el trabajo tiene como objetivos:

- Brindar una panorámica sobre las ventajas y aplicabilidad del tratamiento anaeróbico del residual más agresivo de la industria sucroalcoholera, en reactores UASB, para la producción de biogás, con fines energéticos.
- Demostrar la viabilidad económica de la tecnología de producción de biogás para su conversión en energía eléctrica, en un escenario cubano como caso de estudio, aplicando a la venta de bonos de carbono, bajo acuerdos del protocolo de Kioto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para demostrar la factibilidad de la tecnología de digestión anaerobia empleando vinazas de destilerías tratadas en reactores UASB, se hace un análisis del estado del arte de esta tecnología, teniendo en cuenta los reportes nacionales e internacionales del tema. La viabilidad económica se presenta haciendo uso del software económico COMFAR III EXPERT (ONUDI, 2001), en un caso de estudio, tomando las premisas y datos económicos de la planta de biogás del complejo agroindustrial Heriberto Duquesne de la provincia de Villa Clara. El caso de estudio prevé el uso del biogás para generar electricidad, una vez desulfurado y sus aguas tratadas anaeróbicamente son pos-tratadas en un sistema aeróbico de biodiscos, así como los lodos generados, en sustitución de

fertilizantes químicos en el cultivo de la caña de azúcar; cerrándose así, el ciclo de los efluentes.

2.1. Tratamiento anaeróbico de vinazas de destilería en reactores UASB para la producción de biogás.

Los reactores más empleados para los tratamientos anaeróbicos de residuales líquidos de alta carga orgánica, son los reactores anaerobios de cama de lodo de flujo ascendente, o Up Flow Anaerobic Sludge Blanket, conocido por sus siglas en inglés como *UASB reactor* (Satyawali and Balakrishnan, 2008; Feroso, 2009; España-Gambo et al., 2011). Además es informado por autores como: Bezerra (2006) Terry, (2012) y Cabrera (2013) que son los más empleados para tratar vinazas de destilerías a escala industrial.

Las razones principales de la aplicabilidad de los reactores *UASB* son: (Lettinga and Hulshoff, 1991; Wesley y Barbosa, 2000; Terry, 2012).

- ✓ la capacidad de remover con alta eficiencia la demanda química de oxígeno, incluso en aguas con altas concentraciones de materia orgánica,
- ✓ la habilidad de asimilar diferentes tipos de cargas orgánicas (tanto bajas como altas), lo que se evidencia en la Tabla 1.
- ✓ el desarrollo de un lodo granular que le confiere alta sedimentabilidad,
- ✓ pueden trabajar a cortos tiempos de retenciones hidráulicos (Tabla 1),
- ✓ por ser sencillos y poseer en la parte superior un separador de gases y sólidos,
- ✓ y por tener relativamente bajos costos de inversión, operación y mantenimiento, comparado con otros reactores.

Tabla 1. Plantas de tratamiento anaerobio con reactores UASB a diferentes cargas orgánicas.

Compañías	Tipo de producto	V_R (m^3)	Flujo (m^3/d)	DBO (kg/m^3)	DQO (kg/m^3)	T ($^{\circ}C$)	Carga Orgánica Volumétrica ($kgDQO/m^3d$)	TRH (h)	Eficiencia	
									DBO (%)	DQO (%)
Venco (NL)	Licores	50	36	ND	18,0	30 - 35	13,0	33	ND	90
Bavaria (NL)	Cervecería	1400	6000	1,0	1,6	20 - 24	6,8	5,6	90	80
Usina (BRA)	Destilería	120	60	ND	35,0	35	15,0	48	ND	80
Usina Sao Joao (BRA)	Destilería	1500	750	ND	30,0	35	15,0	48	ND	80
Ontarctica (BRA)	Cervecería	1200	3100	1,9	3,0	30 - 35	8,0	9	80	75
Polar C.A. (VEN)	Cervecería	2000	6100	1,0	2,9	30 - 40	9,0	8	ND	75
Heriberto Duquesne (CUB)	Destilería	3000	900	23,0	47,0	30 - 35	20,0	24	75	70

Leyenda: V_R : Volumen del reactor; *NL*: Holanda; *BRA*: Brasil; *VEN*: Venezuela; *CUB*: Cuba; *ND*: No determinada.

Modificado de Lorenzo (2008)

La tabla 1 evidencia la capacidad de los reactores UASB de trabajar a diferentes cargas orgánicas y tiempos de retenciones hidráulicos (TRH), sin variar la eficiencia de remoción de la carga contaminante. Se evidencia también, que el empleo de estos reactores para el tratamiento de los efluentes de destilerías son óptimos, y se justifica por los grandes volúmenes de residuales generados por día (14-16 L vinaza/L etanol) y las altas concentraciones del residual en forma de Demanda Química de Oxígeno (30-47 kgDQO/m³). Estos tipos de residuales pueden ser tratados en reactores UASB con alta eficiencia, a elevadas cargas orgánicas y tiempos cortos de retención como se evidencia en la tabla 1.

La desventaja principal de estos reactores es que las aguas residuales no deben contener altos valores de sulfatos ni sólidos suspendidos, pues de esta forma disminuye el rendimiento de biogás por inhibición de la bacterias metanogénicas y para el caso de aguas residuales con altos contenido de sólidos pueden ocurrir fenómenos de lavado en el reactor y acidificación del medio. Estos reactores además, necesitan de un lodo granular y en caso de no contar con ellos a partir de otras plantas de tratamientos, se deberá adaptar el mismo; por consiguiente, el tiempo de puesta en marcha de la planta se alargaría aproximadamente de 6 a 8 meses (Obaya y col., 2005; Lorenzo, 2008). Además, el proceso también puede ser inhibido por la presencia de altos niveles de potasio, altos niveles de metales o altos niveles de compuestos fenólicos en el residual a tratar, así como altas concentraciones de DQO por encima de “100 kg/m³” lo que puede ser resuelto diluyendo la vinaza hasta aproximadamente “50 kg/m³” de DQO (Terry, 2012).

Autores como Lettinga and Hulshoff (1991), Wesley y Barbosa (2000) y Terry (2012) hacen referencia a la factibilidad técnica del tratamiento de las vinazas de destilerías en reactores UASB; siendo Brasil el país latinoamericano pionero en implementar a escala industrial esta tecnología desde 1981 en la destilería Central Jacques Richer, la que contaba con un digestor de 330 m³ (Wesley y Barbosa, 2000).

Las vinazas de destilerías generadas en Cuba poseen mayor carga orgánica que las que poseen los restantes países sucroalcoleros, pues el etanol en Cuba se produce a partir de miles finales o intermedias y no de corrientes azucaradas de la producción de azúcar. En la tabla 1 se evidencia que las vinazas de destilerías cubanas son más contaminante que las producidas en otras destilerías. Estas diferencias en términos de DQO y DBO, además de los volúmenes generados por litro de etanol, se deben no solo a los tipos de sustratos empleados, sino también por los sistemas de fermentación y destilación utilizados en la producción de etanol. Una destilería cubana convencional cuenta con una producción de etanol de 500 m³/d y puede generar 800 m³ de vinaza diariamente con una concentración de 45-68 kg DQO/m³, de ahí la dimensión de su impacto ambiental, si no son tratadas o dispuestas adecuadamente. Todo ello sustenta la importancia de investigar y probar a escala industrial, sistemas eficientes para el tratamiento de estos residuales en las condiciones cubanas.

En Cuba investigadores como Pérez y col. (2000) y Bermúdez (2003), han investigado el comportamiento del tratamiento de vinazas de destilería en reactores UASB a escala de banco y laboratorio, en ensayos discontinuos, respectivamente, obteniendo alta remoción de la materia orgánica (alrededor del 80%). Otros autores como Obaya y col. (2005) y Lorenzo (2008) del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de azúcar, *ICIDCA*, demostraron la factibilidad tecnológica de la producción de biogás en reactores UASB a partir del tratamiento de vinazas de destilerías cubanas en sistemas continuos.

Solo los investigadores del *ICIDCA* han desarrollado la tecnología de tratamiento de vinazas de destilería a nivel industrial, en reactores *UASB*. La tecnología, única de su tipo en Cuba, fue probada primeramente a escala de laboratorio en las instalaciones del *ICIDCA* y puesta en marcha industrialmente en la empresa azucarera Heriberto Duquesne de Villa Clara. La planta industrial está diseñada para tratar de 800-900 m³ de vinaza con 50 kg DQO/m³ (tabla 1) en tres reactores de biogás de 1300 m³ cada uno para generar alrededor de 16000 m³ biogás/d (Obaya y col., 2005) y 3 t lodo fertilizante/d.

Actualmente, en la planta de biogás de Heriberto Duquesne, después de varios cambios tecnológicos de su concepción original (Lorenzo, 2008), la planta ha podido trabajar continuamente, demostrándose la innovación tecnológica de estos cambios operacionales y constructivos, basados fundamentalmente en la etapa de adecuación del medio de fermentación y la desulfuración del biogás (etapas que se encuentran en evaluación para patente de innovación). 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 de fuel oil y a partir de la zafra 2011-2012 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.

Las experiencias a escala de laboratorio, piloto e industrial de esta tecnología, demuestran la factibilidad técnica de producción de biogás a partir de residuales de la industria sucroalcoholera cubana, en especial las vinazas de destilería, las cuales poseen altas cargas orgánicas e impactan al medio, si no son tratadas adecuadamente (tabla 1). Comparando en la tabla 1, los resultados obtenidos por otros países con los obtenidos a escala industrial en Cuba, éste último se encuentra en los rangos óptimos de eficiencia, en términos de remoción de la materia orgánica (70-80% DQO) e incluso los obtenidos en Cuba son a mayores cargas orgánicas (20 kg/m³d), lo que hace factible la introducción de esta tecnología a escala industrial en las condiciones cubanas de producción.

Otras de las potencialidades y aplicabilidad de las tecnologías de producción de biogás a partir del tratamiento de efluentes, es que se son consideradas a nivel internacional, como la mejor alternativa de proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), pues poseen un alto potencial de reducción de gases de efecto invernadero (GEI), ya que estos efluentes de alta carga orgánica, al descomponerse, emiten grandes cantidades de metano (CH₄) y otros gases nocivos que son “secuestrados” en el biogás que será utilizado con fines energéticos. Se considera también que la tecnología de producción de biogás en reactores UASB es la más prometedora y factible de estas tecnologías para aplicar a los proyectos MDL, pues el tratamiento de los efluentes y la generación de

biogás como biocombustible, se produce en grandes volúmenes con relación a la cantidad de residual a tratar y en tiempos muy cortos (de 1 a 3 días) (Cubaenergía, 2010). De esta forma los proyectos de producción de biogás a partir de vinazas de destilerías pueden ser apoyados económicamente, mediante los acuerdos de ventas de bonos de CO₂, a partir de la reducción de las emisiones del proyecto, acuerdo conveniado en el protocolo de Kioto; ayudando de esta forma a los países desarrollados a cumplir parte de sus compromisos de reducción de emisiones, mediante la compra de los bonos de CO₂, equivalentes a los certificados de reducción de emisiones, *CERs*, así como también a contribuir con el desarrollo sostenible del país encargado del proyecto (Cubaenergía, 2010).

2.2. Factibilidad técnico-económica de la producción de biogás a partir del tratamiento anaeróbico de vinazas de destilerías en reactores UASB

En el proceso de producción de alcohol las mieles son fermentadas y posteriormente destiladas para separar el alcohol contenido en el líquido fermentado. La corriente de efluentes resultante, conocida como vinazas o mostos de destilerías tiene una Demanda Química de Oxígeno como promedio de 50 kg/m³ (cuando la producción de alcohol es a partir de miel B) y un bajo pH, produciéndose 16 litros de vinazas por litro de alcohol producido. La destilería de estudio genera un volumen de vinaza de 800 m³/d y sus características químicas se listan en la tabla 2; residual que no puede ser vertido sin tratamiento previo.

Tabla 2. Caracterización de las vinazas de la destilería del caso de estudio (Lorenzo, 2008).

<i>Parámetros</i>	<i>Unidad</i>	<i>Promedio</i>
DQOt	g/L	47,61
DBO	g/L	23,00
pH	-	4,04
ST	g/L	43,43
STF	g/L	13,86
STV	g/L	29,57
SST	g/L	3,31
SSF	g/L	1,98
SSV	g/L	1,33
SDT	g/L	42,10
SDF	g/L	11,88
SDV	g/L	30,22
Nitrógeno	g/L	0,36
Fósforo	g/L	0,45
Calcio	g/L	0,29
Sulfatos	g/L	2,75
Cloruros	g/L	5,64

2.3. Aspectos tecnológicos de la producción de biogás a partir de vinaza de la destilería

La planta de biogás del caso de estudio trata 800 m³ de vinaza en tres digestores anaerobios UASB de 1300 m³ cada uno, generado para producir electricidad y entregar

al sistema energético nacional. La tecnología de producción de biogás propuesta se divide en ocho áreas de trabajo:

- 1- Recepción de la vinaza.
- 2- Adecuación del medio de fermentación.
- 3- Primer tratamiento: Pre-acidificación y digestión anaerobia.
- 4- Segundo tratamiento: Fermentación aeróbica con biodiscos.
- 5- Adecuación y almacenamiento del biogás.
- 6- Producción de energía eléctrica.
- 7- Secado y despacho de lodos.
- 8- Servicios auxiliares.

1. Área de recepción de la vinaza.

El residual alcohólico (vinaza) a la salida de la columna de destilación tiene una temperatura de 95-100°C aproximadamente. Para utilizar parte del calor de las vinazas se requiere la instalación de un intercambiador de calor de tubos y corazas para calentar los vinos de la fermentación a contracorriente, bajando la temperatura de la vinaza hasta 85°C. La vinaza, una vez que intercambia calor se conduce por gravedad hasta un tanque receptor ubicado en la planta de biogás.

2. Adecuación del medio de fermentación.

En el local de adecuación del medio de fermentación se realizan las operaciones de enfriamiento, adición de nutrientes, ajuste del pH.

Para lograr la temperatura adecuada del medio de fermentación se precisa la instalación de dos intercambiadores de calor de tipo placa. Primero la vinaza debe intercambiar calor con los efluentes de la planta de tratamiento y luego con agua y esta última se recircula mediante una torre de enfriamiento de tiro inducido. En este proceso la vinaza disminuye su temperatura hasta 37°C, condición óptima para la digestión anaerobia.

En un tanque Batch agitado son adicionados los nutrientes (N y P) necesarios para el crecimiento de la biomasa responsable de la degradación de la materia orgánica dentro del reactor. Esta operación se realiza solo hasta que los microorganismos anaeróbicos y el lodo microbiológico estén adaptados completamente (primeros 5 a 6 años de explotación de la planta). Luego de la adición de nutrientes se ajusta el pH con una solución de cal, necesaria para elevar el pH de la vinaza entre 6,5 y 7,5, intervalo óptimo para el buen desarrollo de los microorganismos. La carga volumétrica de trabajo es de 20 kg DQO m³/d.

3. Primer tratamiento. Pre-acidificación y digestión anaerobia.

Los sedimentadores–preacidificadores (tanques SP), correspondientes a cada módulo del reactor UASB, tienen como función sedimentar la cal no disuelta y las bacterias acidogénicas suspendidas que se producen en el proceso de acidificación y de esta forma el medio de fermentación pasa a los reactores UASB.

Estos reactores trabajan con un tiempo de retención hidráulico de 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.

4. Segundo Tratamiento: Fermentación aeróbica con biodiscos.

El efluente de los reactores es recogido por unos canales de derrames, situados a ambos lados de los reactores y conducido por tuberías al segundo tratamiento (aeróbico) con el objetivo de eliminar el 30% de la materia orgánica restante.

5. Adecuación y almacenamiento del biogás.

El gas obtenido en el reactor UASB pasa a un sistema de desulfuración compuesto por una torre de lavado y a un reactor de desulfuración para eliminar el sulfuro de hidrógeno H_2S . Una vez desulfurizado se almacena en un gasómetro de campana móvil que se desliza por una estructura de acero, con capacidad de 500 m^3 .

6. Producción de energía eléctrica.

El biogás producido y libre de H_2S (desulfurado) se suministra a la turbina que genera la energía eléctrica que se vende al Sistema Electroenergético Nacional *SEN*. Diariamente se estima una producción de 22220 kWh.

7. Secado y despacho de lodos.

Los lodos generados en las áreas del primer y segundo tratamiento, junto con los del área de adecuación y almacenamiento del biogás, serán conducidos hasta el separador de sólidos donde se elimina el 90% de su humedad, obteniéndose de esta forma un total de 4,73 t lodo fertilizante seco/ d.

8. Servicios auxiliares.

Agua de proceso:

El suministro de agua industrial es mediante el bombeo de agua de pozo. El máximo consumo de agua industrial de este sistema es de $76\text{ m}^3/\text{d}$.

Esta tecnología de producción de biogás contribuye a mitigar el calentamiento global por la disminución de las emisiones de dióxido de carbono CO_2 a la atmósfera, por el petróleo combustible dejado de consumir y por la captura y destrucción del metano generado en la descomposición de la materia orgánica (71 t CO_2 dejado de emitir /d).

2.4. Viabilidad económica

Para evaluar la factibilidad económica de la propuesta tecnológica se emplea la herramienta para análisis financieros y económicos, el software COMFAR III EXPERT (ONUDI, 2001) y para los procedimientos, los descritos en su manual de usuario. Dicho software es avalado por las naciones unidas para el desarrollo, ONUDI, desde el año 2000, como ayuda en el análisis de proyectos de inversión, estudios de oportunidad, pre-factibilidad y factibilidad para las inversiones internacionales (ONUDI, 2001).

Las salidas o resultados del proyecto, el software lo realiza en una sola moneda como moneda total, pero permite calcular los costos en otra moneda, creada por el usuario a partir del porcentaje (%) que representa la segunda moneda con respecto a la moneda total.

2.4.1. Bases y premisas económicas para el caso de estudio

- Para el cálculo de los productos generados en la planta, así como los insumos de esta tecnología, se utilizan las diez (10) ecuaciones básicas reportadas por Van Lier (2005; 2005a) y Lorenzo (2011).
- La planta se ubica dentro del perímetro de la destilería propuesta, por lo cual el costo de adquisición del terreno es cero.
- La planta opera 270 días al año, tiempo promedio de producción de las destilerías en Cuba (Lorenzo, 2008 y Cabrera, 2013).
- Se considera que el biogás producido y desulfurado será destinado totalmente para alimentar la microturbina y generar electricidad.
- El horizonte de planificación financiera es para 20 años incluyendo el año de construcción, lo cual está dentro del margen considerado para proyectos de plantas de biogás de esta capacidad (Cubaenergía, 2010)
- El monto de preparación y acondicionamiento del terreno representa un 10% del valor total del costo de equipamiento reflejado en la partida “maquinarias y equipos” (tabla 4), lo cual está dentro del margen considerado por Peters (1968). Esta cifra tiene en cuenta, fundamentalmente, los trabajos asociados a la construcción de los digestores anaerobios.
- La inversión para las obras de ingeniería civil y estructuras representa un 5% del valor total del equipamiento (Peters, 1968).
- El monto considerado para los equipos tecnológicos proviene de estimaciones realizadas con el auxilio de programas de cómputo profesionales (Software libre Matches, 2012) y de ofertas de compras de equipamientos para la planta de biogás Heriberto Duquesne (ICIDCA, 2008).
- En la estimación de los gastos pre-operativos asociados al proyecto se toma un 5% del valor total del equipamiento (Peters, 1968).
- Para la estimación del monto necesario para los imprevistos del proyecto, se toma un 5% del valor total del equipamiento, según los márgenes para imprevistos que sugiere el manual de estudios de viabilidad Industrial de la ONUDI (2001).
- La moneda extranjera se consideró como dólares americanos (USD) y la moneda local, como pesos cubanos (MN), a una tasa de cambio de 1USD = 1 MN.
- Se tomó como año de referencia para el análisis de producción, el año 5 en el cual la planta trabaja a plena capacidad.
- Se considera la venta de los CERs como 10 USD/ton CO₂ dejada de emitir, (Cubaenergía, 2010).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los balances de materiales para una planta de biogás que trata 800 m³/d de vinaza, de características reflejadas en la tabla 3, aplicando la tecnología de tratamiento descrita anteriormente y tomando como base de cálculo las referidas por Van Lier (2005; 2005a) y Lorenzo (2011), arrojan como resultados una producción de biogás diaria de 13070 m³ y 4,70 t/d de lodo fertilizante.

Los insumos necesarios para la producción de biogás a máxima capacidad, así como los principales productos generados con esta tecnología, se enuncian en la tabla 3.

Tabla 3. Programa de producción e insumos en el año 5 de referencia

<i>Producto o Insumo</i>	<i>U</i>	<i>Flujo diario</i>
<i>Insumos</i>		
Vinaza (43 kg DQO/m ³)	m ³ /d	900
Cal	t/d	2,19
Agua	m ³ /d	76,60
Nutrientes	t/d	0,88
<i>Productos</i>		
Biogás	m ³ N/d	13 072,00
Electricidad diaria	kW	22 223,00
Lodo	t/d	4,73
CO ₂ dejados de emitir	t/d	71

La vinaza no tiene costo por ser un insumo que proviene de la destilería, fábrica anexa a la planta de biogás y que se genera dentro del propio complejo fabril.

Las cantidades de CO₂ dejadas de emitir se calcularon a partir de la metodología internacional para los proyectos de reducción de emisiones del mecanismo de desarrollo limpio (Cubaenergía, 2010).

Los costos de inversión y producción de una planta UASB dependen las características del residual a tratar, de la capacidad de la planta, los equipamientos auxiliares, el uso de las corrientes resultantes (biogás, lodo y agua pos-tratada), las facilidades del pos-tratamiento, entre otros aspectos. En el costo también influye notablemente la situación local y por tanto los precios de los insumos (Pérez y col, 2000; Lorenzo, 2008; Lorenzo 2011).

En la tabla 4 se muestra el desglose de la inversión fija por sus componentes principales, mientras que en la tabla 5 aparece reflejado el desglose de la inversión total, incluyendo el monto de los gastos pre-operativos y de capital de trabajo asociados al proyecto.

Tabla 4. Costo total de inversión fija del proyecto

<i>Partidas</i>	<i>Valor (MT)</i>
Adquisición del terreno	0
Preparación y acondicionamiento del terreno	322 652,60
Obras ingeniería civil, estructuras y edificaciones	161 326,30
Maquinarias y equipos	3 226 526,00
Imprevistos	161 326,30
TOTAL INVERSIÓN FIJA	3 871 831,20
Parte en divisas (USD)	100%

Legenda: MT: Moneda total

Se aprecia en la tabla 4 que la partida “maquinarias y equipos” es la más importante dentro del costo total de inversión fija del proyecto, representada en moneda extranjera en un 100% USD.

Tabla 5. Resumen del monto total de la inversión

<i>Partidas</i>	<i>Total</i>	<i>Construcción</i>	<i>Total Producción (año 5)</i>
Costos de inversión fija	3 871 831,20	3 871 831,20	
Gastos pre-operativos	604 531,30	604 531,30	
Aumento de capital de trabajo neto	5 773,17		5 773,17
COSTOS TOTALES DE INVERSION	4 482 135,67	4 476 362,50	5 773,17
Parte en divisas (USD)	100%	100%	100%

Teniendo en cuenta los costos de inversión reflejados en la tabla 5 se asume que esta tecnología tiene un costo de inversión unitario de 0,13 USD/m³N, similar al informado por Bermúdez y col (2003) (0,07-0,17 USD/m³N), aunque inferior al informado por Pérez y col. (2000) para una planta similar (0,35 USD/m³N) con uso del biogás para generar vapor en caldera, el lodo para alimento animal y sus aguas tratadas para el fertirriego del cultivo de caña de azúcar. Estudio de prefactibilidad reciente (ICIDCA, 2008) para una planta de biogás de vinaza en Uruguay con generación de electricidad y pos-tratamiento aerobio de sus aguas residuales, indica que el costo de inversión unitario es 0,31 USD/m³N. Diferencias y similitudes de valores que evidencian lo descrito anteriormente para los costos de inversión y producción de una planta.

Las premisas fundamentales para la estimación de los costos de producción del caso de estudio son las siguientes:

- Los precios de los insumos de la producción (fosfato diamónico, urea, cal y agua) se toman de los precios de las importaciones para Cuba por el grupo empresarial AZCUBA (AZCUBA, 2012).
- Los costos de las materias primas (nutrientes), solo se tienen en cuenta en los primeros 5 años de producción, según tecnología propuesta por el ICIDCA, basada en la adaptación del lodo (Lorenzo, 2008) y en los precios de sus importaciones (AZCUBA, 2012).
- Se considera el monto de la partida “costos de administración”, como el pago necesario para el monitoreo y validación de las ventas de los *CERs*, que es el 20 % de las ventas de estos en cada año (Colectivo de autores, 2010).
- Los primeros dos años de vida del proyecto no se obtienen ganancias por las ventas de los *CERs*, pues es el plazo máximo para los trámites de monitoreo y validación por la junta directiva del mecanismo de desarrollo limpio (Cubaenergía, 2010).

La ficha de costo de la tecnología de producción de biogás a partir de vinaza de destilería para generar energía eléctrica, se aprecia en la tabla 6, para el año 5 de producción.

Tabla 6. Ficha de costo de la producción de biogás a partir de vinazas de destilería

<i>Partidas</i>	<i>Valor (MT) (año 5)</i>
Materias primas	495 783,37
Servicios generales	50 696,85
Mano de obra	27 223,20
Reparaciones y mantenimiento	185 525,00
Costos de administración	38 317,34
Depreciación	169 392,62
COSTO DE PRODUCCION TOTAL	1 409 907,57
Parte en divisas (USD)	88,58%

Se aprecia en la tabla 6 que el elemento de costo de producción más importante es el valor de las materias primas. El costo unitario es de 0,39 MT/m³N, superior al reportado por Pérez y col. (2000), Bermúdez y col. (2003) entre (0,07-0,1 MT/m³N), (0,06 y 0,13 MT/m³N), para un período de recuperación de la inversión de 3 años. Estudio de prefactibilidad reciente (ICIDCA, 2008) para una planta de biogás de vinaza en Uruguay con generación de electricidad y pos-tratamiento aerobio de sus aguas residuales, indica que el costo de producción unitario es 0,16 para un período de recuperación de 5,12 años.

3.1. Evaluación financiera del proyecto

La evaluación financiera del proyecto se realiza a partir del análisis de los elementos que a continuación se exponen, considerando los siguientes supuestos:

- No se considera el efecto de la inflación en la evaluación financiera.
- La evaluación se realiza en ambas monedas y un factor de descuento del 10%.
- El proyecto será apoyado como mecanismo de desarrollo limpio *MDL*, acordando la compra de certificados *CERs* en un acuerdo a largo plazo de 20 años, que incluirá pagos de 10 dólares/t de CO₂ dejados de emitir (Cubaenergía, 2010).
- Las fuentes de financiación se consideran a partir de un préstamo a largo plazo para el pago de la inversión fija, en moneda extranjera, a un interés del 10%, con el primer año de gracia y capitalizando intereses. Esta deuda se pagará en cuotas regulares en 10 años.
- El proyecto pagará un impuesto a la renta del 35% en moneda local a partir del segundo año de producción.

3.1.1. Indicadores de Rentabilidad para la Inversión Total

La tabla 7 muestra los indicadores de rentabilidad de la inversión.

<i>Indicadores</i>	<i>Valor</i>
Valor actual neto al 10%, <i>VAN</i> (\$)	4 325 947,14
Tasa interna de retorno, <i>TIR</i> (%)	22,57
Periodo de recuperación de la inversión, <i>PRI</i> (años)	5,77
Razón <i>VAN</i> /inversión, <i>RVAN</i> (\$)	1,04

Se aprecia en la tabla 7 que el valor actual neto *VAN* es positivo y la tasa interna de retorno *TIR* es superior a la tasa de descuento empleada (10%), lo que demuestra la factibilidad económica del proyecto de inversión en un periodo de recuperación de la inversión *PRI* de 5,77 años, tiempo razonable dentro del horizonte de planificación del proyecto; lo que se evidencia en el indicador *RVAN*, haciéndolo un proyecto atractivo, ya que por cada peso invertido se obtiene una utilidad neta actualizada de \$1,04 en MT. Al analizar el flujo financiero del proyecto, se evidencia la necesidad de pedir préstamos a corto plazo para pagar en moneda local los costos directos e indirectos como mano de obra, cuentas por pagar, etc., a pesar de que el proyecto en moneda total tiene excedentes. Otra vía para ajustar las monedas sería la venta de divisas (moneda extranjera), siendo esta alternativa la más factible económicamente. En este caso se realizó el análisis para la alternativa menos favorable, con préstamos a corto plazo en todos los años, a pagar con un interés del 10%.

A partir de los resultados económicos se evidencia y se llega a la conclusión de que esta tecnología tiene una gran viabilidad financiera, pues la factibilidad de estos tipos de proyectos ambientales, no se sustentan por las ganancias netas, sino por el impacto ambiental y social que tiene su implementación, ya que pocas veces tienen ganancias y factibilidad económica. De esta manera las ventas de los *CERs* en estos proyectos, inyectan una entrada de efectivos extra, siendo de esta forma factibles económicamente y muy atractivos para los países en vías de desarrollo.

Las peculiaridades del proyecto evaluado como los costos de inversión, producción y ventas locales, inciden en los indicadores de rentabilidad y por ende en el resultado del flujo económico financiero para su comparación con proyectos similares. En este sentido, en su carácter de estudio de prefactibilidad, la información obtenida permite sentar bases sólidas, para estudios posteriores más profundos y detallados como los estudios de factibilidad económica.

En este sentido, mediante el caso de estudio evaluado se demuestra la factibilidad tecnológica, económica y ambiental de la tecnología de producción de biogás a partir de vinazas de destilerías, pues se resuelven tres problemas a la vez: el impacto ambiental (con el tratamiento de las vinazas de destilerías), la insuficiencia de fuentes de energía renovables (con la generación de biogás) y la rentabilidad de la inversión (con la venta de los *CERs*).

4. CONCLUSIONES

1. La digestión anaerobia en reactores UASB para el tratamiento de residuales industriales de alta carga orgánica, como son las vinazas de destilerías cubanas, representa una alternativa de tratamiento factible para estos efluentes, pues por un lado trata biológicamente el residual y por otro se produce un biocombustible con fines energéticos,
2. Resulta posible obtener financiamiento internacional, sustentado en el mecanismo de desarrollo limpio del protocolo de Kioto, dadas las características y productividad de este tipo de planta en un escenario cubano.
3. Los resultados económicos del caso de estudio evidencian la viabilidad financiera de la tecnología de producción de energía eléctrica a partir de la bioenergía (biogás)

generada por digestión anaerobia en reactores UASB de vinazas de destilería, con cierre de ciclo de sus efluentes, para un VAN \$ 4 325 947,14 USD, una TIR de 22,57% y un PRI de 5,77 años.

REFERENCIAS

- AZCUBA, Ficha insumos de las producciones de azúcar y sus derivados., 2012.
- Bermúdez, Rosa, C., Rodríguez, Suyen, Martínez, María, C., Ferry A., Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás., Tecnología Química, Vol. 22, No. 2, 2003, pp. 44-37.
- Bezerra, V., Anaerobic treatment of vinasse in a UASB reactor under thermophilic conditions (55°C) and submitted to progressive organic loadings., Tesis en opción al título de Máster en Hidráulica y Saneamiento, Escuela de Ingeniería de Sao Carlos. Sao Paulo, 2006, Disponible en: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-26032007-125625/es.php>. [Consultado: 20 ene: 2011]
- Cabrera, A., Tratamiento de vinazas en un filtro anaerobio empacado de flujo ascendente., Tesis en opción al grado de Máster en Ingeniería Ambiental, ISPJAE, La Habana, Cuba, 2013.
- Colectivo de autores. Curso de energía y cambio climático, Parte 2, Programa Universidad para todos, 2010.
- Cubaenergía, Fortalecimiento de capacidades para la implementación del Mecanismo de Desarrollo Limpio en Cuba, [CD room]: Primer taller Nacional, La Habana, 2010.
- España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J. Hernández-Zarate, G., Alzate-Gaviria, L. Vinasses: characterization and treatments. Waste Management & Research, Vol. 29, No. 12, 2011, pp. 1235–1250.
- Fermoso, F.G., Bartaceka, J., Jansenc, J., Lens, P. Metal supplementation to UASB bioreactors: from cell-metal interactions to full-scale application., Science of the total environment, Vol. 407, 2009, pp. 3652-3667.
- ICIDCA, Ofertas de equipamientos para plantas de biogás. Informes internos del grupo nacional de biogás del ministerio del azúcar., 2008.
- ICIDCA, Estudio para el tratamiento de los residuales de la destilería de ALUR en el Alfredo Mones Quintero con la producción de energía eléctrica., Informe interno ICIDCA, 2008.
- Lettinga, G. and Hulshoff, L. UASB Process design for various types of wastewater. J Water Science and Technology, Vol. 24, No. 8, 1991, pp. 87-107.
- Lorenzo, Yaniris. La Energía en la Protección del Medio Ambiente. Estudio de las modificaciones al esquema tecnológico de la producción de biogás a escala piloto., Tesis para optar por el grado de Máster en Ciencias técnicas, ISPJAE, La Habana. 2008.
- Lorenzo, Yaniris. Doctorado en Medio Ambiente. CUJAE-UPV 2009-2011. Resultados de docencia e investigación,: 183-198, 1^{ra} ed. UPV, Valencia. ISBN: 978-84-8363-834-7, 2011.
- Menéndez, C., y Pérez, Olmo, J., Proceso para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales., 52-255, 1^{ra} ed. Félix Varela, La Habana, 2007.

- NC 27: 2012, Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado-Especificaciones. 2^{da} ed. ICS: 13.060.30.
- NC 521: 2007, Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas-Especificaciones. 1^{ra} ed. ICS: 13.060.30.
- Obaya, María. C, Valdé, Esperanza, Lorenzo, Yaniris, Gallardo, Mariela, León, Olga, L., Diez, Katia., Mecanismos de desarrollo limpio en una planta de tratamiento de vinazas de azúcar con reactores UASB. Consideraciones técnicas y económicas sobre su aplicación., Tecnología del Agua, Vol. 263, 2005, pp. 89-98.
- ONUDI. COMFAR III Expert para Windows. Manual del usuario, 1-159, 3^{ra} ed. ONUDI, Viena, 2001.
- Pérez, J. L., Bermúdez, Rosa, C., Cárdenas, J. R., Viabilidad técnico-económica del establecimiento de un biodigestor UASB en la destilería Nauyú., Tecnología Química, Vol. 20, No. 2, 2000, pp. 68-60.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers, Edición Revolucionaria, Instituto del Libro, La Habana, 1968.
- Satyawali, Y., and Balakrishnan, M., Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review. Journal of Environmental Management, Vol. 86, pp. 481–497, 2008.
- Software libre Matches. Matches' Process Equipment Cost Estimates. En: <http://www.matche.com/equipcost/Default.html> [Consultado: jun: 2012], 2012.
- Terry, A.I., Comportamento da Biomassa de Reator Anaeróbico Utilizado no Processamento de Vinhaça de Destilaria de Álcool., Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Hidráulica e Saneamento, São Carlos. 2012.
- Van, Lier, J.B., Full Scale Application of High-rate Anaerobic Wastewater Treatment. Practical Guidelines., [CD room]: curso de capacitación para ICIDCA, 2005.
- Van, Lier, J.B., Environmental Management Expert misión to “Instituto de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, ICIDCA”. Informe interno, PNUD E780449. 2005b.
- Weiland, P. Biogas production: current state and perspectivas., J Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 85, 2010, pp. 849–860.
- Wesley, J. y Barbosa, L. A., Vinhaca de cana de açúcar. 155-179. 1^{ra} ed. Agropecuária, série Engenharia Agrícola, Guaíba, 2000.