

Tratamiento industrial de vinazas de destilerías en reactores UASB

Industrial Treatment from Distilleries Vinasses in UASB Reactors

MSc. Yaniris Lorenzo-Acosta, yaniris.lorenzo@icidca.edu.cu; Dr.C. Fidel Doménech-López; Dr.C. Felipe Eng-Sánchez; Dr.C. Oscar Almazán-del Olmo, Tec. Juana Ma. Chanfón-Curbelo

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), La Habana, Cuba

La digestión anaerobia en reactores UASB es muy utilizada desde los años 80 en países latinoamericanos, a escala industrial, para tratar efluentes líquidos, entre ellos, las vinazas de destilerías. De ahí la importancia de mostrar las ecuaciones de diseño y los resultados de la potencialidad de una planta de biogás, utilizando un caso de estudio industrial, en el tratamiento en reactores UASB de las vinazas de una destilería de 500 HL etanol/d, presentados como objetivo principal del trabajo. Se muestra además, el diagrama de flujo de esta tecnología y se explican sus etapas. Los resultados de los balances de masa demostraron que para tratar toda la vinaza generada con 50 kg DQO/m³, para su conversión en energía eléctrica, es necesaria la instalación de 2 reactores de 1 160 m³ cada uno; siendo las potencialidades de producción de esta tecnología de: 12 821 m³ biogás desulfurado/día, 21 796 kWh eléctrico, 4,33 t/día lodo seco y 716 m³ vinaza/día con 15 kg DQO/m³, que pueden ser utilizadas en el fertirriego del cultivo de la caña de azúcar, como opción de cierre de ciclo de tratamiento y disposición de corrientes residuales. Ello evidencia, que la digestión anaerobia de vinazas de destilerías, tratadas en reactores UASB como opción de tratamiento primario y cierre de ciclo con fertirriego, hace a la producción de etanol ser amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: potencial de producción de biogás, vinazas de destilería digestión anaerobia, reactores UASB.

The anaerobic digestion in UASB reactors is well known since the 80, at industrial scale, in Latin American countries, for the treatment of liquid wastes, including the ethanol vinasses. That's the importance to present the equations used in the design and the results of the actual potentiality of a biogas plant, using as a case of study an, the vinasses treatment of a distillery of a capacity of 500 HL of ethanol per day. The flow sheet of the technology and an explanation of the stages are also shown. The results of the mass balance confirm that to treat the whole vinasses generated with a COD of 50 kg per cubic meter, to be converted in electric energy, it's necessary to install two UASB reactors of 1 160 cubic meters each, being the production potential of this technology of 12 821 cubic meters of desulphurized biogas per day, 21 796 kWh of electric energy, 4,33 t per day of dry mud and 716 cubic meters of vinasses with only 15 kg of COD per cubic meters, that could be used for ferti-irrigation of the cane fields, as an option to close the treatment cycle and waste disposal. All this drive to the conclusion that the anaerobic digestion of the distillery vinasses in UASB reactors as a primary treatment option, with the use of the treated vinasses for the ferti-irrigation of the cane fields to close the cycle make the ethanol production true ecofriendly.

Keywords: biogas production potential, distillery vinasses, anaerobic digestion, UASB reactors.

Introducción

La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento de efluentes representa una excelente alternativa para la sustitución de combustibles fósiles no renovables, a la vez que ofrece soluciones eficientes que dan respuesta a la contaminación de las aguas residuales como son las vinazas de destilerías /1, 2/.

En este sentido el trabajo tiene como objetivos: exponer la tecnología de tratamiento de las vinazas de destilería en reactores UASB, mediante un caso de estudio industrial; presentar el diagrama de flujo y las ecuaciones de diseño y los balances de masa, para calcular las potencialidades de una planta de biogás con opción de cierre de ciclo de sus efluentes mediante el uso de las vinazas tratadas, luego de la digestión anaerobia, como agua de riego (fertirriego) en los campos de cultivo de la caña de azúcar.

Fundamentación teórica

A nivel mundial, existen diferentes tipos de reactores anaerobios diseñados para tratar efluentes, siendo estos de flujo ascendente con manto de lodo, conocidos por sus siglas en inglés como (UASB reactors), los más empleados para el tratamiento de efluentes líquidos /1/, especialmente vinazas de destilerías /2, 3/. La aplicabilidad de los reactores UASB se basa en la posibilidad de tratar efluentes líquidos de muy alta carga orgánica a bajos tiempos de retención y altas eficiencia de hasta 90 % /3-7/, con bajos costos de construcción, producción y mantenimiento /8, 9/. Conocer las etapas de producción de esta tecnología y las ecuaciones de diseño de una planta industrial constituye la novedad del trabajo.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

En el trabajo se exponen diez ecuaciones de diseño y balances de masa para determinar el potencial de producción de biogás en el tratamiento de vinazas de destilería en reactores UASB. Para ello se utiliza un caso de estudio de una destilería de 500 HL etanol/d; se tienen en cuenta las características físico-químicas de las vinazas a partir de la fermentación de miles intermedias de la producción de etanol, 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.

Descripción de la tecnología de producción de biogás

La tecnología de producción de biogás para generar electricidad a partir de vinazas consta de ocho etapas:

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 y una carga orgánica 50 kg DQO d/m³. Para utilizar parte del calor de las vinazas hay instalado un intercambiador de calor en la destilería para disminuir la temperatura hasta 85 °C que luego es conducido hasta el tanque de recepción de vinaza del área de “adecuación del medio de fermentación”.

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 utilizar parte del calor de las vinazas hay instalado dos intercambiadores de calor de 5 y 27 m³ de área de intercambio. Primero, las vinazas a enfriar intercambian calor con las vinazas pos-tratadas del reactor UASB y luego con agua, bajando su temperatura hasta 37 °C, lo que permite lograr la temperatura adecuada del medio. En esta área es necesaria una torre de enfriamiento que consume 2 m³/h de agua de reposición. Posteriormente, la vinaza a 37 °C en un tanque Batch agitado son adicionados los nutrientes (N y P) necesarios para el crecimiento de la biomasa. Luego se ajusta el pH alrededor de 7, con una solución de cal. 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), tienen como función sedimentar la cal no disuelta y las bacterias acidogénicas suspendidas que se producen en el proceso de acidificación; de esta forma el medio de fermentación pasa a los reactores UASB. Estos reactores trabajan con un tiempo de retención hidráulico de dos 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. 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 al sistema de fertirriego de la caña, mediante pipas cisternas, cumpliendo con la normativa cubana de riego NC 855:2011 /10/.

5. 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 (H_2S). Una vez desulfurado 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) para una producción de 22 220 kWh, diariamente.

7. 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 /12/.

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 $85\text{ m}^3/\text{d}$ que incluye enfriamiento de la vinaza, preparación de la cal, preparación de nutrientes y analítica del laboratorio de control.

Premisas del caso de estudio

- El caso de estudio corresponde a una destilería de capacidad potencial de producción de alcohol de 500 HL/día que trabaja a 90 % de su capacidad 270 días del año.
- El índice de generación de vinaza es de $1,6\text{ m}^3$ vinaza/HL etanol con concentración de $50\text{ kg DQO}/\text{m}^3$, la que se utilizará totalmente para la producción de biogás.
- Para el cálculo de las potencialidades de los productos generados, se utilizan las 10 ecuaciones básicas, enunciadas en este trabajo (ecuaciones 1-10) /12 - 14/.

- Los balances de masa y energía, están referidos a la tecnología de tratamiento anaerobio para producir biogás en reactores UASB y su uso, para generar energía eléctrica, una vez desulfurado.
- Para el cálculo del potencial de generación de vinaza en la destilería se tuvo en cuenta el índice de generación y la capacidad de operación de la destilería al 90 %.
- Se considera que la tecnología logra disminuir la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de las vinazas en un 70 % y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en más de un 95 %.
- Se considera que en la digestión anaerobia el rendimiento de bacterias esperado Y (0,1 kg biomasa/ kg DQO), el metano en el biogás es el 70 % y la temperatura de trabajo del reactor 35 °C. La equivalencia volumétrica del metano referida a DQO es de 0,35 (m³ metano/kg DQO) /12, 13, 15/.
- La producción de lodo está relacionada con la cantidad de DQO convertida, para un rendimiento del 10 % /12, 13/.
- El consumo de micronutrientes: urea (NH₂)CO y fosfato de amonio (NH₄)₂ HPO₄, se basa en la relación óptima DQO:N:P de 100:1:0,1 /10, 16/.
- La vinaza pos tratada se utilizará: una parte para la desulfurización del biogás que después se recircula al proceso y que se une con el resto de los efluentes líquidos de la planta para el fertirriego de la caña como acción de cierre de ciclo en el aprovechamiento total de los efluentes.
- Se considera que todo el biogás producido y desulfurado será destinado totalmente para alimentar la microturbina y generar electricidad. El índice de generación de electricidad por m³ de biogás es de 1,7 kWh/m³ biogás /17/.

En el diseño de una planta de biogás es necesario calcular el volumen de reactor y para ello se precisa saber las características de la vinaza a tratar, en términos de contaminación y la carga de operación del reactor (carga orgánica volumétrica).

El cálculo del volumen total de reactor UASB a construir, necesario para tratar la vinaza, se calcula teniendo en cuenta la DQO de la vinaza a la entrada del reactor, el flujo de generación cuando la planta trabaja al 100 % de su

capacidad, la máxima carga orgánica volumétrica de trabajo del reactor y el factor de diseño de 1,1 /8,14/.

El flujo de efluente a tratar, su composición en términos de DQO y temperatura, así como la eficiencia de remoción del tratamiento anaerobio y el porcentaje del metano en el biogás, son indispensables para determinar la cantidad de biogás que se obtendrá en una planta de este tipo. Teniendo en cuenta las premisas anteriores, y las ecuaciones 1-10 se calculan los principales parámetros de diseño y el potencial de biogás de una planta industrial de estas características /14/.

Balances de materiales para el cálculo de la capacidad potencial de una planta de biogás. Parámetros de operación y diseño

Cálculo del flujo de entrada de residual a tratar en un reactor

$$F = Vol / TRH \quad (1)$$

Cálculo de la carga orgánica volumétrica de trabajo del reactor

La carga orgánica que entra al reactor dependerá de la DQO del residual líquido a tratar, del flujo de residual que entra al reactor y del volumen del mismo.

$$K = F \cdot C / Vol \quad (2)$$

donde

Vol = volumen de trabajo del reactor (m³).

TRH = tiempo de retención hidráulico (d).

F = flujo de entrada de efluente al reactor (m³/d).

K = carga orgánica volumétrica (kg DQO/m³.d).

C = concentración del residual a la entrada del reactor (kgDQO/m³).

En caso de que se requiera trabajar con residuales altamente contaminantes, para mantener la carga orgánica con un valor igual a 20 kg DQO/m³d, el balance de materia es el siguiente:

Entrada = salida

$$\text{Nutrientes (kg)+agente neutralizante (kg)+agua (kg)+vinaza (kg) = lodo (kg)+biogás (kg)+residual tratado (kg)} \quad (3)$$

De la ecuación 3, se infiere de que como el agua, los nutrientes y el agente neutralizante no aportan DQO, el balance por componentes (DQO) se expresa en la ecuación 4, ecuación utilizada para saber la cantidad de agua a adicionar al efluente, para llevar de una concentración de DQO a otra menor y poder trabajar en el reactor a carga de 20 kg DQO/m³d):

$$\text{kg efluente } i * \text{DQO efluente } i = \text{kg medio} * \text{DQO medio} \quad (4)$$

$$\text{kg efluente } i = v \text{ efluente } i * \rho \text{ efluente } i \quad (5)$$

$$V \text{ efluente } i * \rho \text{ efluente } i * \text{DQO efluente } i = V \text{ medio} * \rho \text{ medio} * \text{DQO medio} \quad (5 \text{ en } 4)$$

$$V \text{ medio} = V \text{ efluente } i * \rho \text{ efluente } i * \text{DQO efluente } i / (\rho \text{ medio} * \text{DQO medio})$$

$$V \text{ dil } i-f = V \text{ medio} - V \text{ efluente } i \quad (6)$$

donde

$V \text{ efluente } i$ = volumen inicial de efluente a tratar (m³).

$\rho \text{ efluente } i$ = densidad del efluente a tratar.

DQO medio = DQO final del medio (efluente y agua).

$V \text{ medio}$ = volumen final agua y efluente que hay en el reactor para tener una concentración de efluente de 20 kgDQO/m³.

$\rho \text{ medio}$ = densidad del medio (agua, efluente inicial, agente neutralizante y nutrientes).

$V \text{ dil } i-f$ = volumen de agua a adicionar para diluir el efluente de una DQO inicial hasta la DQO de trabajo (kg DQO/m³).

En caso de no trabajar con el residual diluido el valor de ($V \text{ dil } i-f$), corresponde al agua ahorrada. En este caso hay que trabajar a mayores TRH para mantener la carga de trabajo en altos valores, aspecto a tener en el dimensionamiento (tamaño) del reactor UASB.

Cálculo de la cantidad de biogás producido en la planta de tratamiento:

Se utiliza un día (como base de cálculo) para los balances.

$$V \text{ CH}_4 = Q * \text{DQO biodegradable} * (1 - Y) * \eta \text{DQO-biodegr} * 0,35 * (T + 273) / 273 \quad (7)$$

Volumen de biogás producido:

$$V \text{ biogás (m}^3) = V \text{ CH}_4 / (\% \text{CH}_4 \text{ en biogás} / 100). \quad (8)$$

V biogás = volumen de biogás producido por día (m^3).

% CH_4 en biogás = porcentaje del metano en el biogás (%).

Cálculo de la cantidad de electricidad generada en turbinas a partir de biogás.

$$E \text{ (kWh)} = V \text{ biogás desulf} * I_e \quad (9)$$

donde

$V CH_4$ (m^3) = volumen de metano producido (m^3).

Q = flujo de vinaza (m^3/d).

$DQO_{biodegradable}$ = DQO de la vinaza (kg/m^3).

Y = crecimiento de bacterias esperado (0,02 – 0,15) kg biomasa/ kg $DQO_{convertida}$.

$\eta_{DQO-biodegr}$ = eficiencia del tratamiento/100, referida a DQO.

0,35 = equivalencia volumétrica del metano en 1 kg de DQO (m^3/kg).

t = temperatura de operación del reactor ($^{\circ}C$).

E (kWh) = producción de electricidad.

V biogás desulf = volumen de biogás producido en la planta una vez desulfurizado (m^3).

I_e = índice de generación de electricidad/ m^3 de biogás = 1,7 kWh/m^3 biogás /17/.

Cálculo de la cantidad de lodo microbiológico producido por día en una planta de producción de Biogás.

La producción de lodo está relacionada con la cantidad de DQO convertida y se estima que el rendimiento es del 10 %.

$$\text{kg de lodo fresco} = ((Q \times DQO_{biodegradable} * (\text{Eficiencia del tratamiento} / 100) * Y) / 0.7 \text{ kg TS/kg VSS}) \times 10 \text{ kg lodo fresco/kg TS.} \quad (10)$$

donde:

Q = flujo de residual (m^3/d).

DQO biodegradable = DQO de entrada al reactor (kg/m^3).

Y = rendimiento de Lodo= 0,1 (kg VSS/ kg DQO).

Eficiencia del tratamiento/100 = 0,7

0,7 kg VSS / kg TS (70% del lodo es material orgánico y 30% de cenizas)

10 kg lodo fresco/kgTS (90% agua y 10 % material seco)

$$v = m / \rho$$

$$v \text{ lodo (m}^3\text{)} = m \text{ lodo (kg)} / \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}.$$

V lodo (m³) = volumen del lodo producido.

m lodo (kg) = cantidad de lodo producido.

ρ (kg/m³) = densidad del lodo.

Cálculo de los consumos de nutrientes

Se utilizará como ejemplo, los micronutrientes: sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄ y fosfato de amonio (NH₄)₂HPO₄. Los resultados de este balance dependerán de los tipos de nutrientes utilizados y de la relación DQO:N:P. Una relación óptima comprobada a escala de laboratorio e industrial es la relación 100:1:0,1 /12,16/ y como ejemplo DQO entrada al reactor de 47 kgDQO/m³, se tiene:

DQO	N	P	Necesidades de N y P
100	1	0,1	X1= 0,47 g/L de nitrógeno
47	X1	X2	X2= 0,047 g/L de fósforo

Como el fosfato monobásico tiene:

100 g de fosfato monobásico ----- 23,5 g P

X3 (g de fosfato monobásico) ----- 0,047 g de P

$X3 = 0,047 \cdot 100 / 23,50$ g de fosfato monobásico/l = 0,20 kg de fosfato monobásico/m³ de residual.

Se necesitan 0,20 kg de fosfato monobásico/m³ de residual, lo que implica que:

100 g de fosfato monobásico ----- 21 g N

0,20 g de fosfato monobásico ----- X4 g de N

$X4 = 21 \cdot 0,20 / 100 = 0,04$ g/L de nitrógeno

Lo que implica que es necesaria otra fuente de N para llegar a 0,47

Para esto se tiene (NH₄)₂ SO₄. La cantidad de N ahora necesaria es de:

$0,47 - 0,04$ g/L = 0,43 g/L

100 g de sulfato de amonio ----- 21 g N

X5 g de sulfato de amonio ----- 0,43 g de N

$X5 = 0,43 * 100 / 21 =$ g de sulfato de amonio/L = 2,04 g de sulfato de amonio/l

Se necesitan 2,04 kg de sulfato de amonio/m³ de residual.

El consumo de nutriente al día es = consumo de nutriente (kg/m³)* flujo (m³ de residual /d).

Para 47 kg DQO/ m³ de efluente, el flujo que entra al reactor es 800 m³/d.

Por tanto, el consumo de (NH₄)₂ HPO₄ por día = 0,2 kg/m * 800 m³/d = 160 kg/del consumo de (NH₄)₂ SO₄ = 2,04 kg/m³ * 800 m³/d = 1 632 kg/d.

Los consumos anuales en toneladas de nutriente (para este ejemplo) son:

(NH₄)₂ HPO₄ = 160 kg/d *300 d/a / 1 000 kg/t = 48 ton/a

(NH₄)₂ SO₄ = 1 632 kg/d *300 d/a / 1 000 kg/t = 489,6 ton/a

Resultados y discusión

Los balances de masa y energía dan como resultado que la vinaza neutralizada, fría y después de la etapa de acidogénesis, entra a los reactores UASB para su metanogénesis con una concentración de 43 kg DQO/m³ a un flujo de 893 m³/d (ecuaciones 1-10 y tabla 1). La tabla 1, refleja los datos y resultado de los cálculos para la determinación del volumen y tiempo de retención hidráulico necesario para tratar las vinazas a máxima carga orgánica volumétrica de operación de 20 kg m³/d.

Tabla 1
Cálculo del volumen del reactor

Aspectos	Unidades	Valores
Destilería		
Capacidad potencial producción alcohol 100 v/v	m ³ /d	50,00
Aprovechamiento capacidad potencial	%	90,00
Índice generación vinaza	m ³ vinaza/m ³ etanol	16,00
Días de operación de la planta	día	270,00
Características vinaza		
DQO	kg/m ³	50,00
DBO	kg/m ³	24,00
Densidad	kg/ m ³	1 013,0
Sólidos suspendidos totales	kg/m ³	40,00
Temperatura	°C	85,00
Vinaza a tratar (50 kg DQO/m ³) a 90% capacidad de la destilería	m ³	739
Tratamiento anaeróbico (reactor UASB)		
DQO vinaza entrada al reactor UASB	kg/m ³	43,00
Vinaza a tratar en reactores (a 43 kg DQO/m ³)	kg/m ³	893
Carga orgánica volumétrica	kg m ³ /d	20,00
Eficiencia de remoción del reactor UASB	%	70,00
Recirculación del efluente	%	20,00
Rendimiento de bacterias esperado	kg biomasa/kg DQO	0,10
Eficiencia de remoción del tratamiento	%	70,00
Equivalencia de producción del metano	m ³ /kg DQO	0,35
Temperatura del reactor	°C	35,00
Porcentaje del metano en el biogás	%	70,00
Porcentaje de recirculación	%	20,00
Volumen total de reactor útil	m ³	1 899
Volúmenes de reactores de diseño a construir	2 reactores (m ³)	1 160
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	días	2,13

La vinaza generada en la destilería de este caso de estudio, posee una carga orgánica de 50 kg DQO/m³ y se generan 739 m³ diariamente cuando la destilería opera al 90 % de la capacidad de producción (tabla 1). Es necesario calcular la cantidad biogás a generar a 90 % de la capacidad de generación de vinaza, pues de esta manera se tiene en cuenta las paradas no planificadas y las posibles fluctuaciones de las operaciones. Siendo así, una vez que la vinaza es enfriada, neutralizada y después de la etapa de acidogénesis, entra a los reactores UASB para su metanogénesis con una concentración de 43 kg

DQO/m³ a un flujo de 893 m³/d. Por otro lado, para dimensionar los equipos involucrados en la tecnología es necesario saber la máxima producción que se obtendrá en cada etapa trabajando la destilería a máxima capacidad, por tanto, para las vinazas generadas en una destilería de 500 HL, es necesario la construcción de dos reactores UASB de 1 160 m³ cada uno (tabla 1).

De la ecuación 1 y 2, así como de la tabla 1, se llega a la conclusión de que si se tiene un residual de alta carga contaminante (alto valor de DQO y DBO) y que se genere a gran volumen por hora (a gran flujo), para mantener la carga orgánica del reactor en valores altos, ejemplo 20 kg DQO/m³d, se deberá diluir el residual a tratar (empleando agua de dilución) /11/ o aumentar el TRH (para no diluir el residual). Esta última operación es la más ventajosa pues el volumen de residual a tratar es menor (3); aspecto a tener en cuenta en el diseño del sistema de tratamiento, abaratándose así el sistema de bombeo, el consumo de agua de la planta, el consumo de energía para la transportación, el pos-tratamiento y la disposición final del residual. De este modo, todas estas ventajas conllevan a una disminución de los costos de operación de la planta de tratamiento anaerobio /8/.

Los insumos de las materias primas de la tecnología de producción de biogás en reactores UASB son: vinaza, agua, cal y nutrientes, los que son reflejados en la tabla 2.

Tabla 2
Insumos de producción

Insumos	Unidades	Flujo diario
Vinaza a tratar (50 kg DQO/m ³) a 90 % capacidad de la destilería	m ³ /d	739
Cal	t/d	2,19
Agua total	m ³ /d	85
Agua para preparación de la cal	m ³ /d	21,88
Agua preparación de nutrientes	m ³ /d	8,78
Agua reposición torre enfriamiento	m ³ /d	53,13
Agua laboratorio análisis y otros usos	m ³ /d	1
Nutrientes		
(NH ₄) ₂ HPO ₄	t/d	0,16
(NH ₄) ₂ CO (urea)	t/d	0,72

Los insumos de la tecnología se basan en los consumos de nutrientes que en este caso son: fosfato diamónico, urea, así como, agua para preparar los

nutrientes, la cal como agente neutralizante preparada a 4^o Be (tabla 2), habiendo además, para la arrancada de la planta, un consumo de 112 m³ más de agua para la torre de enfriamiento.

Los subproductos generados en esta tecnología son: biogás, lodo microbiológico con propiedades fertilizantes y agua de riego, los que se exponen en la tabla 3.

Tabla 3
Producción de biogás

Aspectos	Unidades	Valores
Producción de biogás		
Flujo de vinaza que entrada al reactor	m ³ /d	893,24
DQO de entrada	kg/ m ³	43
Volumen de metano producido	m ³ /d	9447,17
Porciento del metano en el biogás	%	70
Volumen de biogás producido	m ³ biogás/d	13 495,96
Volumen de biogás producido año	m ³ biogás/a	3 643 909
Volumen de biogás producido desulfurado	m ³ biogás/d	12 821
Volumen de biogás desulfurado	m ³ biogás/a	3 461 714
Generación de electricidad		
Índice de generación de electricidad/ m ³ de biogás	kWh/m ³ biogás	1,70
Producción de electricidad por año	kWh al año	5 884 914
Potencia de instalación de microturbina	kW al día	956
Producción de lodo		
Lodo total húmedo	t/h	1,8
Lodo total seco	t/h	0,18
Lodo total seco	t/d	4,33
	t/año	1 168,15
Vinaza pos-tratada a utilizar en el fertirriego		
Cantidad de vinaza tratada en reactores UASB	m ³ /d	716,3
Cantidad de vinaza tratada a utilizar en fertirriego	m ³ /a	17 191,2
DQO vinaza tratada a utilizar como fertirriego	kg/m ³	15

En la tecnología de producción de biogás a partir de vinazas, el biogás obtenido es necesaria su desulfuración por los altos contenidos de sulfuro de hidrógeno (compuesto corrosivo) /16/. Esta etapa es posible realizarla por métodos físicos, químicos o biológicos. El caso de estudio tiene en cuenta los resultados a escala industrial de un proceso físico-biológico para este fin,

obteniéndose de esta manera 3 461 714 m³ biogás/año, lo que hace necesario la instalación de una microturbina de 1mW para generar diariamente 21 796 kWh para un total de 5 884 914 kWh al año (tabla 3).

La vinaza pos-tratada con esta tecnología y para este caso de estudio, teniendo en cuenta un 70 % de la remoción de la carga orgánica en términos de DQO es de 15 kg DQO/m³; aunque se han informado mayores remociones en reactores UASB con igual tipo de residual /7/.

Es informado por varios autores que las vinazas pos-tratadas anaerobiamente poseen aun nutrientes capaces de aumentar el rendimiento de cultivos como lo es la caña de azúcar /4, 16, 18/. De esta manera se disminuye el consumo de fertilizantes químicos, de agua cruda para riego (716 m³/día) y se encuentra una solución ambiental de cierre de ciclo de tratamiento y disposición final de efluentes.

El lodo residual de la digestión anaerobia ha sido recomendado en la agricultura como un excelente acondicionador de suelo, al mejorar las condiciones físicas del mismo /4, 16, 19/, produciéndose en este caso de estudio 4,3 t/día de lodo seco y estabilizado que puede ser utilizado para este fin.

Conclusiones

El empleo de la tecnología de digestión anaerobia como tratamiento de los efluentes de destilerías disminuye el impacto ambiental de la producción de etanol, pues se obtiene una reducción de la carga contaminante de sus vinazas en un 70 %, a la vez que se genera un biocombustible (biogás) que puede utilizarse con fines energéticos, y dos subproductos: agua tratada y biofertilizante, como sustitutos de fertilizantes químicos y agua de riego, lo que hace a la tecnología de producción de etanol ser amigable con el medio ambiente.

Los cálculos técnicos estiman que para el tratamiento de las vinazas de una destilería de 500 HL de etanol/d, teniendo en cuenta las premisas del caso de estudio, es necesario diseñar dos reactores UASB de 1 160 m³ cada uno.

En esta tecnología, las potencialidades de producción diarias son: 12 821 m³ biogás desulfurado, 21 796 kWh de electricidad 4,33 t lodo seco y 716 m³ vinaza con 15 kg DQO/m³, que pueden ser utilizadas en el fertirriego del cultivo de la caña de azúcar como opción de cierre de ciclo de tratamiento y disposición de corrientes.

Bibliografía

LETTINGA, G.; HULSHOFF-POLL, L.W. "UASB Process design for various types of wastewater". *Water Science and Technology*. 1991, vol. 24, núm. 8, p. 87-107.

WESLEY, J.; BARBOSA, L. A. *Vinhaca de cana de açúcar*. Segunda edición. Série Engenharia Agrícola. Guaíba, Brasil: Editorial. Agropecuária, 179 p. 2000.

RAJESHWARI, K. V. "State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment". *Renewable sustainable energy reviews*. 2000, vol. 2, p.135-156.

BERMÚDEZ, R.; RODRÍGUEZ, S.; MARTÍNEZ, M.; C., TERRY, A. "Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás". *Tecnología Química*. 2003, vol. 22, núm. 2, p. 37-44.

PÉREZ, J. L.; BERMÚDEZ, R.; CÁRDENAS, J. R. "Viabilidad técnico-económica del establecimiento de un biodigestor UASB en la destilería Nauyú". *Tecnología Química*. 2000, vol. 20, núm. 2, p. 68-60.

MENÉNDEZ, C.; PÉREZ OLMO, J. *Proceso para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales. Tratamiento anaerobio*. Segunda edición. Ciudad de La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela 255 p., 2007.

SATYAWALI, Y.; BALAKRISHNAN, M. "Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review". *Journal Environmental Management*. 2008, núm. 86, p. 481-497.

LORENZO, Y. "La energía en la protección del medio ambiente. Estudio de las modificaciones al esquema tecnológico de la producción de biogás a escala piloto". Dirección. Oscar Almazán del Olmo. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Química, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", 2008.

WEILAND, P. "Biogas production: current state and perspectivas", *Journal Applied Microbiology Biotechnology*. 2010, núm. 85, p. 849-860.

MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE (CITMA). *Utilización de las aguas residuales de la industria azucarera y de derivados en el fertirriego de la caña de azúcar*. NC 855: 2011. La Habana: *Gaceta oficial de la República de Cuba*, 2011.

COLECTIVO DE AUTORES. Compendio de los derivados de la caña de azúcar. Monografía 23 "Tratamiento de las vinazas alcohólicas y producción de biogás". 4ta ed., Ed. ICIDCA, La Habana, 2008. ISBN: 978-9597165-18-7

VAN LIER, J.B. *Full Scale Application of High-rate Anaerobic Wastewater Treatment. Practical Guidelines* [CD-ROM]. Universidad de Wageningen, Holanda, 2005. [Consultado, 18 septiembre de 2010]. Disponible en: Biblioteca ICIDCA.

VAN LIER, J.B. *Environmental Management Expert misión to Instituto de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, ICIDCA, No E780449. La Habana: PNUD, Proyectos de Naciones Unidas para el Desarrollo, 2005, 21 p.

LORENZO, Y. Doctorado en Medio Ambiente. CUJAE-UPV 2009-2011. Resultados de docencia e investigación. 1ra ed., 234 p. Ed. UPV, Valencia, 2011, ISBN: 978-84-8363-834-7

FIELD, J.; CIERRA, R.; LETTINGAN, G. *Ensayos anaeróbios*. 4 ed. Barcelona, España: Secretariado de Publicaciones Universidad de Valladolid, España, 1998, [Consultado, 23 Septiembre de 2012], [CD-ROM]. 4to Seminario de Depuración Anaerobia de Aguas Residuales.

OBAYA, M. C. *et al.* "Desarrollo de una tecnología de tratamiento de las aguas residuales de las destilerías de alcohol". Informe inédito No.00103008. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, 2004.

Oficina Nacional de Estadísticas. *Inventario Nacional de Fuentes de Energía Renovables*. [Disponible en línea: <<http://www.one.cu>>]. Oficina Nacional de Estadística de Cuba, 2002008 [Consultado, 25 de junio de 2011].

PÉREZ, I.; GARRIDO, N. "Aprovechamiento integral de vinazas de destilerías. Una revisión actual". *Ingeniería Química*. 2006, vol. 38, num. 435, p. 129-133.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). *El biogás. Producción y utilización*. Segunda edición. Serie Mejores cultivos. Roma: Editorial FAO, 52 p., 1983.

LORENZO, Y., *et al.* "Producción de bioenergía a partir del tratamiento anaerobio de vinazas de destilerías en reactores UASB". *Revista Centro azúcar*. 2005, vol. 41, núm. 3, p. 78-93.

INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIONES DE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR (ICIDCA). *Estudio para el tratamiento de los residuales de la destilería de ALUR en el Alfredo Mones Quintero con la producción de energía eléctrica*. La Habana: Editorial ICIDCA, 2008, 58 p. Informe inédito No.02120908.

Pérez J. L.; Bermúdez Rosa, C.; Cárdenas J. R. "Viabilidad técnico-económica del establecimiento de un biodigestor UASB en la destilería Nauyú". *Tecnología Química*. 2000, vol. 20, núm. 2, p. 68-60.