



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
5-12; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Comparación de dos alternativas para el tratamiento de vinazas generadas en la producción de alcohol de caña de azúcar

Norma Eliana Soledad Medina*; Romina Salazar** y Eugenio Quaia*

* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC); ** Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).
Email: smedina@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La importancia que actualmente tienen los temas energéticos en el mundo obliga a la búsqueda permanente de opciones energéticas y ambientales a los combustibles derivados de hidrocarburos. El bioetanol, producido con eficiencia y sustentabilidad, es capaz de responder a la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y competir en precio con las energías convencionales de origen no renovables. Sin embargo, esta alternativa a los combustibles fósiles trae consigo el grave problema de la generación de efluentes como la vinaza. El objetivo de este trabajo fue comparar dos alternativas de producción de energía y biofertilizantes, mediante aprovechamiento de las vinazas generadas por la industria sucro-alcoholera en la provincia de Tucumán. Estas alternativas fueron: concentrar Vinazas y generar Biogás en ambos casos como combustibles para generación eléctrica. Del estudio realizado surge que podría producirse energía eléctrica con una potencia de 2,288 MW y obtener 18,829 tn/día de cenizas ricas en potasio a partir de la concentración y combustión de vinaza o se podrían generar 57 389 m³ biogás/día, para producir energía eléctrica con una potencia de 1,756 MW y 265,2 tn/día de biofertilizante líquido rico en potasio y nitrógeno, mediante la biodigestión y concentración de la misma. Se determinó que ambas alternativas, permitirían aprovechar energéticamente la vinaza. Además, presentan ventajas para su disposición final, lo que haría posible que esta se realice de una forma más segura. A su vez, ofrecen la posibilidad de recuperar los nutrientes de la vinaza.

Palabras clave: Bioetanol, biofertilizante, biogás.

ABSTRACT

Comparison between two alternatives to the treatment of vinasse generated in the sugarcane alcohol production

The importance that all energy issues have nowadays around the world, forces to permanently search for environmental energy options to fuels derived from hydrocarbons. Bioethanol, produced in an efficient and sustainable way, is capable of responding to the urgent need to reduce the greenhouse effect emissions, to improve the quality of the air and to compete on price with conventional energies from non-renewable source. However, this alternative to fossil fuels implies a serious problem of the generation of effluents as the vinasse. The aim of this research was to compare two alternatives of energy and biofertilizers production, through harnessing the vinasse generated by the sugar-alcohol industry in the province of Tucuman. Those alternatives were: to concentrate vinasse and to generate biogas, in both cases as fuels for power generation. It was determined that both alternatives would allow to take advantage of the vinasse, energetically. Moreover, they have advantages for its final disposal, which would make it possible this is done in a safer way. In turn, they offer the possibility to recover the vinasse nutrients. The study suggests that energy could be generated at a power output of 2,288 MW and obtain 18,819 tn/day of ashes high in potassium from the vinasse concentration and combustion or it could be generated 57 389 m³ biogas/day to generate energy at a power output of 1,756 MW and 265,2 tn/day of liquid biofertilizer high in potassium and nitrogen, through its biodigestive work and concentration.

It was determined that both alternatives would allow for the energy recovery of vinasse. In addition, they offer advantages for its final disposal, making it possible to carry it out in a safer manner. Furthermore, they provide the possibility of recovering the nutrients present in the vinasse.

Key words: Bioethanol, biofertilizers, biogas.

Fecha de
recepción:
04/10/2024

Fecha de
aceptación:
22/05/2025

INTRODUCCIÓN

En los últimos dos siglos, la energía se ha convertido en un bien indispensable para llevar a cabo casi la totalidad de las actividades personales y productivas. El desarrollo económico y las exigencias del consumo mundial impulsan una demanda creciente y constante de generación de energía. Sin embargo, los recursos utilizados, en su gran mayoría de origen fósil y no renovable son finitos y tienen un límite que pronto será alcanzado. De acuerdo con el British Petroleum Statistical Review, en el año 2022 los combustibles fósiles representaron el mayor recurso energético utilizado en el mundo, donde el petróleo contabilizó más del 30% del consumo primario. El carbón ocupó el segundo lugar, seguido por el gas natural.

En Argentina en el año 2020, de acuerdo a datos publicados por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación (MINEM), las fuentes fósiles representaron el 90% de la producción total de energía primaria. De los datos anteriores se puede observar que existe una gran dependencia, tanto a nivel mundial como a nivel país, de los combustibles fósiles, lo cual está llevando al mundo a una difícil situación energética.

Las fuentes de petróleo descubiertas hace 40 años, son la base de la producción mundial actual de dicho combustible, y a pesar de que la búsqueda continúa, el apogeo del descubrimiento de petróleo fue entre 1950 y 1980 lo que sugiere que la mayor parte del petróleo ya se ha encontrado.

Por otro lado, es de suma importancia encontrar una solución para la elevada liberación al ambiente de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales provocan un aumento de la temperatura terrestre que trae como consecuencia cambios en las condiciones climáticas del mundo provocando una serie de fenómenos naturales extremos como sequías, olas de calor, inundaciones, tornados y temporales.

La concentración atmosférica de estos GEI se está incrementando continuamente, debido fundamentalmente a las cantidades de dióxido de carbono (el principal aportante de los GEI) que se libera en la quema de combustibles fósiles en el transporte, en procesos industriales y en la generación de energía eléctrica, como así también por cambios en el uso agrícola del suelo, la deforestación y procesos naturales, como la descomposición de la materia vegetal.

Estos motivos han potenciado el interés por las llamadas Energías Alternativas, que son aquellas que, a diferencia de las convencionales, usan como fuente de generación recursos renovables. Entre ellas se encuentra la biomasa, término que se refiere a toda materia orgánica originada en un proceso biológico que puede ser utilizado como fuente de energía. Dentro de este grupo se encuentran los llamados cultivos energéticos a partir de los cuales se pueden obtener combustibles líquidos.

En la actualidad los procesos más destacados para la producción de biocombustibles a partir de biomasa son la esterificación y transesterificación de aceites vegetales para la obtención de biodiesel; los procesos bioquímicos o fermentativos para la obtención de biogás y etanol; y los procesos termoquímicos de conversión (combustión, pirolisis, gasificación, licuefacción) principalmente para obtener calor, combustibles, etc. (Sukumar *et al.*,

2015).

El bioetanol en general se produce a partir de materias primas azucaradas como la caña de azúcar, la remolacha o el sorgo azucarado; o de materias primas amiláceas como el maíz.

En Tucumán el bioetanol es producido en destilerías anexas a ingenios azucareros que utilizan principalmente mieles residuales del proceso de fabricación de azúcar como materia prima.

Dentro del proceso de producción del etanol, la fuente principal de generación de efluentes es la etapa de destilación, en la que se producen grandes volúmenes de un efluente marrón oscuro, conocido como vinaza. La cantidad producida de vinaza en las destilerías de caña de azúcar se encuentra en el rango de 10 a 15 litros por cada litro de alcohol producido (Ortiz y Erazzú, 2019) y posee una alta carga contaminante.

En general, siempre se ha pensado en como disponer las vinazas tratando de minimizar su impacto ambiental y el costo asociado. En este trabajo el objetivo fue analizar dos formas de tratamiento de vinazas generadas en la industria de la caña de azúcar: concentración y combustión versus biodigestión y concentración, y determinar mediante los balances correspondientes las ventajas de los productos y energía resultantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron los dos métodos propuestos para el tratamiento de vinaza (Concentración y combustión y Biodigestión y concentración) con el fin de determinar las cantidades y calidades de los productos que se generan. En ambos casos se consideró una planta que produce 100.000 litros de alcohol por día. Teniendo en cuenta que por cada litro de alcohol producido se generan 13 litros de vinaza, el caudal de la misma a tratar se estableció en 1.300.000 litros por día. Además, se tomó un valor inicial de sólidos de 11°Bx y se fijó un valor final de los mismos en 60°Bx.

Concentración y combustión de vinaza

En primer lugar, se estudió la concentración de la vinaza con la posterior quema de la misma en caldera. En la Figura 1 se presenta un esquema del proceso. En este caso, para resolver el sistema de evaporación, se utilizó el software SICOVIN, desarrollado por Díaz *et al.* (2013), que permite predecir el desarrollo del proceso real mediante su representación a través de un modelo matemático basado en la formulación de balances de materia y energía y la transferencia global de calor en el sistema, junto con el uso de ecuaciones empíricas que modelan las propiedades de la vinaza.

De acuerdo a lo establecido por Díaz *et al.* (2013), para el planteo de los balances de materia y energía, se consideró lo siguiente:

- El proceso opera en estado estacionario.
- El soluto es no volátil y todos los sólidos disueltos son transportados por la corriente de salida; es decir que el vapor vegetal no arrastra sólidos.
- No hay subenfriamiento de los condensados.

- Se emplea vapor saturado para la calefacción.
- Los vapores vegetales sobrecalentados pierden calor en las cañerías, por lo que se asume que salen saturados.
- No hay pérdidas de vapor en la condensación de los vapores utilizados para calentamiento.
- Hay pérdidas por radiación en la transferencia de calor desde el vapor de calefacción al líquido a concentrar.
- La vinaza ingresa al primer efecto a la temperatura de saturación de este.

Para realizar la simulación se consideró una presión de vapor de escape de 2,40 atm, la presión en el último efecto de 0,25 atm y una presión atmosférica de 0,96 atm.

Como se estableció anteriormente, la vinaza que sale de la etapa de evaporación tiene una concentración de 60°Bx. Ésta se utilizaría para la producción de energía a partir de la quema de la misma en calderas. El proceso de combustión se inicia con un combustible tradicional, en este caso bagazo, calentando la caldera hasta alcanzar una temperatura adecuada. Se inyecta luego la vinaza de 60°Bx, reduciéndose gradualmente la cantidad de combustible convencional, hasta que quede operando solo con vinaza como combustible (Perera, 2009).

Para determinar la cantidad de vapor generado por la caldera se tuvo en cuenta la Ecuación 1, de rendimiento de la misma:

Ecuación 1

$$\eta = \frac{\text{calor generado}}{\text{calor teórico}} = \frac{G_v \cdot (H_v - H_a)}{G_{\text{vin}60^\circ} \cdot \text{PCI}_{\text{vin}60^\circ}}$$

Donde:
 η: rendimiento de caldera considerado como 75% (Franck, 2011).
 G_v: caudal de vapor generado en caldera.
 H_v: entalpia de vapor.
 H_a: entalpia de agua.
 G_{vin60°}: caudal de vinaza 60°Bx.
 PCI_{vin60°}: Poder calorífico inferior de la vinaza 60°Bx.

Los valores de entalpias de agua y vapor se extrajeron de tablas teniendo en cuenta los siguientes datos aportados por técnicos de la EEAOC (comunicación

personal): T_{agua} = 106°C; T_{vapor} = 400°C; P_{vapor} = 42 bar. Las entalpías del vapor y del agua fueron entonces 768 kcal/kg y 101 033 kcal/kg respectivamente.

El PCI de la vinaza a 60°Bx se calculó a partir de la Ecuación 2 (Feijóo *et al.*, 2015):

Ecuación 2

$$PCI = PCS \cdot (1 - w) - 2442 \cdot E$$

Donde:
 PCS [kJ/kg de combustible seco] = poder calorífico superior en base seca.
 PCI [kJ/kg de combustible] = poder calorífico inferior en base húmeda (b.h.).
 w [kg agua/kg combustible] = contenido de agua del combustible
 H [kJ H₂/kg de combustible seco libre de ceniza] = contenido de hidrógeno en la materia seca libre de ceniza.
 Cz [kg de ceniza/kg de combustible seco] = contenido de ceniza de la materia seca.

El valor de E (cantidad de agua en los gases de combustión) de la Ecuación 2, se calcula a partir de la Ecuación 3 en [kg agua/kg de combustible]:

Ecuación 3

$$E = 9 \cdot H \cdot (1 - C_z) \cdot (1 - w) + w$$

Entonces, reemplazando en la Ecuación 2, la misma quedó de la siguiente forma:

Ecuación 4

$$PCI \text{ [kJ/kg]} = PCS \cdot (1 - w) - 2442 \cdot x$$

$$[9 \cdot H \cdot (1 - C_z) \cdot (1 - w) + w]$$

Los valores de PCS, H y Cz son 13 301 kJ/kg, 5,2% y 34,65% respectivamente (Zamora *et al.*, 2019).

Para determinar la cantidad de energía generada en este método, se debe conocer el consumo específico de la turbina, que es la cantidad de energía que esta pue-

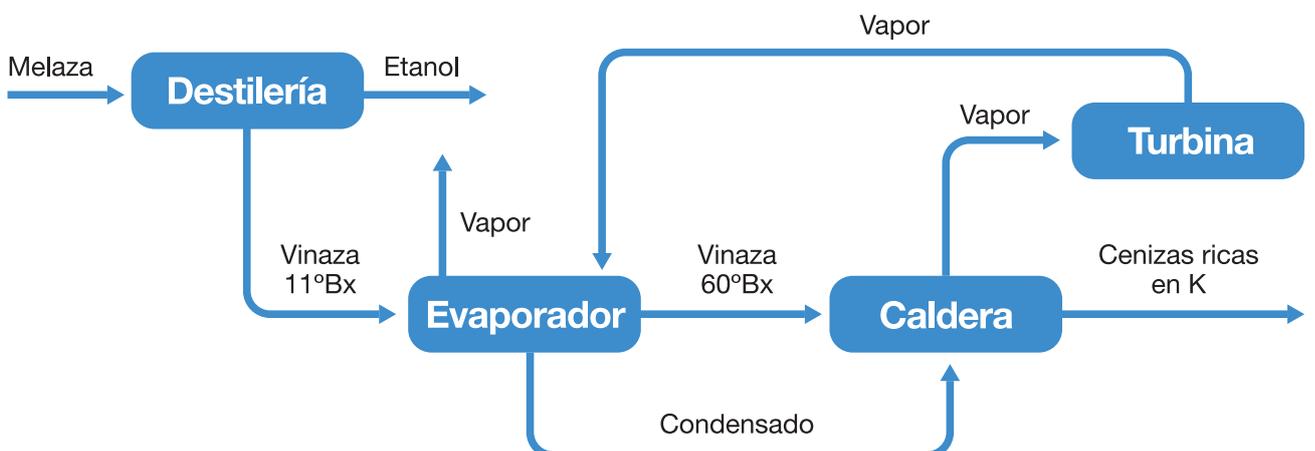


Figura 1. Esquema de un sistema de evaporación de la vinaza con posterior quema en caldera.

de generar a partir de un determinado caudal de vapor. Teniendo en cuenta una presión de 42 bar y una temperatura de 400°C, el consumo específico se determinó en 7,8 kg vapor/kWh (Alderetes, 2016).

Una vez que la vinaza es quemada en la caldera, se obtienen, además del vapor, cenizas ricas en K. Para calcular la cantidad generada del mismo se consideró que este se mantiene sin pérdidas durante el proceso. Para los cálculos se tuvieron en cuenta, el caudal de vinaza que ingresa al sistema de evaporación y la concentración de K en esta corriente, la cual se tomó como 1,42% (Perera, 2009).

Tratamiento biológico anaeróbico. Biodigestión de vinaza con producción de biogás

En segundo lugar, se estudió la biodigestión de vinaza con producción de biogás. En este caso, la vinaza ingresa primero a un reactor anaeróbico UASB, obteniéndose biogás que es enviado a la caldera para la produc-

ción de vapor. La vinaza que sale del reactor, se envía a evaporadores para reducir su volumen.

En la Figura 2 se puede observar un esquema del proceso.

Para el estudio del reactor UASB se utilizó un valor de DQO de entrada (DQO_{e1}) de 120 000 g/m³, dato aportado por el sector de Medio Ambiente de la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial de Tucumán.

El esquema de trabajo que se tomó en cuenta para realizar los cálculos correspondientes es el que se presenta en la Figura 3.

Como puede observarse, la vinaza que proviene de destilería presenta un valor de DQO muy elevado ($DQO_{e1} = 120\ 000\ g/m^3$). La velocidad de la etapa de metanogénesis en el reactor es mucho menor que la velocidad de la etapa de acidogénesis, por lo que, al ingresar una vinaza con elevado DQO, se puede producir la acidificación del reactor con la posterior disminución o muerte de los microorganismos que se encuentran en el mismo, ya que

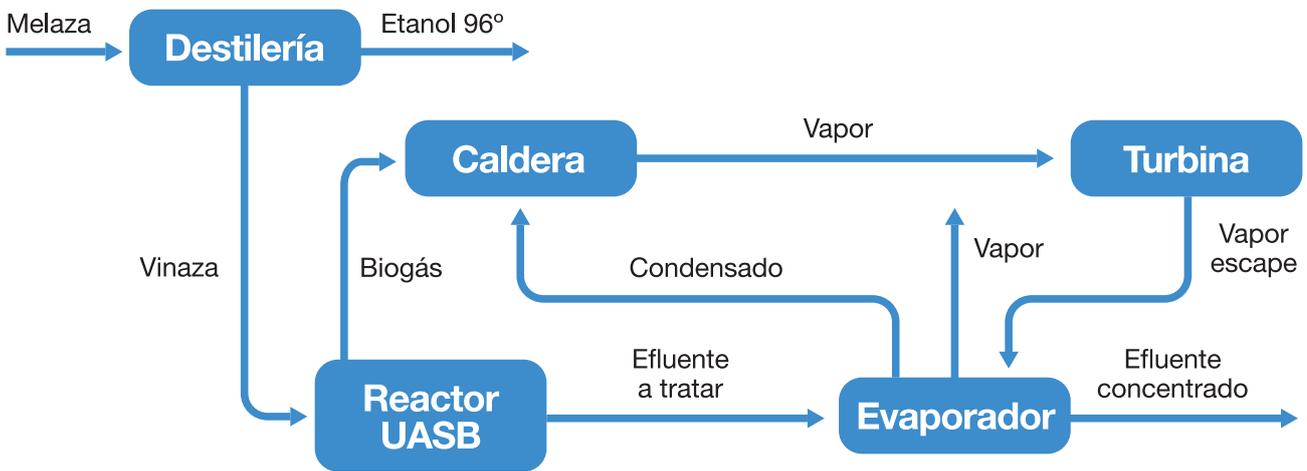


Figura 2. Esquema de un sistema de evaporación de la vinaza de cinco efectos previamente tratada en un reactor anaeróbico y con quema en caldera del biogás.

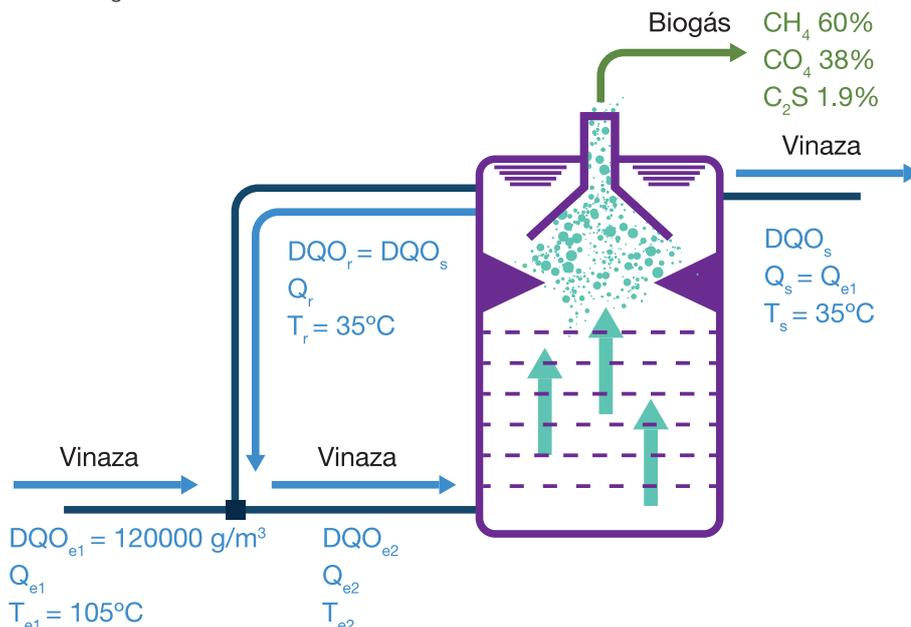


Figura 3. Esquema reactor UASB utilizado para los cálculos.

el pH adecuado para la operación es de 7, aproximadamente. Por ello, se hace necesario colocar un reciclo que permita disminuir el valor del DQO de entrada (DQO_{e1}). Además, con este reciclo se consigue también modificar el pH de la corriente de entrada (la vinaza sale de la destilería con pH bajo, entre 4 y 5) y enfriar dicha corriente hasta la temperatura del reactor.

En este caso se consideraron 5 reactores con un rendimiento individual (η_R) del 75% (Molina *et al.*, 2020), por lo que, el caudal de vinaza a tratar en cada uno de ellos (Q_{e1}) fue de 10,83 m³/h.

La cantidad de biogás producido se obtuvo en función de la cantidad de DQO removido, de acuerdo a la Ecuación 5:

Ecuación 5

$$Q_{BIOGAS} = (DQO_{e1} * Q_{e1} - DQO_s * Q_s) * P_{BG}$$

Donde:

Q_{BIOGAS} : Caudal de biogás producido [m³/d].

DQO_{e1} : Demanda química de oxígeno en vinaza que llega de destilería [g/m³].

DQO_s : Demanda química de oxígeno en vinaza que sale del reactor [g/m³].

Q_{e1} : Caudal de vinaza a tratar [m³/h].

Q_s : Caudal de vinaza tratada [m³/h].

P_{BG} : Cantidad de biogás producido por kg de DQO removido [m³ Biogás/kg DQO_{REMOVIDO}].

El valor de DQO de salida (DQOs) se calculó teniendo en cuenta el rendimiento de cada reactor de acuerdo a la Ecuación 6:

Ecuación 6

$$DQO_s = DQO_{e1} - (DQO_{e1} * \eta_R)$$

Donde:

DQO_{e1} : Demanda química de oxígeno en vinaza que llega de destilería [g/m³].

DQO_s : Demanda química de oxígeno en vinaza que sale del reactor [g/m³].

η_R : Rendimiento del reactor, fijado en 75%, Molina *et al.* (2020)

En cuanto al valor de P_{BG} se adoptó en 0,5 m³ Biogás/kg DQO removido, (Elia Neto y Shintaku, 2009).

Conocido P_{BG} y DQO_s , se calculó la producción de biogás (Q_{BIOGAS}) con la Ecuación 5.

La capacidad de producción diaria de una planta de 5 reactores será entonces:

Ecuación 7

$$Q_{TOTALBIOGAS} = Q_{BIOGAS} * 5 * 24 \frac{h}{d}$$

El biogás obtenido se utilizaría como combustible en la caldera para la posterior generación de energía. Para ello, es necesario eliminar el H₂S del mismo ya que su combustión produce SO₂, gas muy tóxico, corrosivo y for-

mador de las lluvias ácidas. En este trabajo se consideró el método de purificación del biogás a partir de pellets de óxido de hierro con una eficiencia de limpieza del 99,98% (Betzabet Morero, 2014). Con este dato, y teniendo en cuenta que el biogás tiene un 1,9% de H₂S (Leme y Seabra, 2017), fue posible calcular la cantidad total de biogás que ingresará a la caldera de acuerdo a:

Ecuación 8

$$Q_{BG} = Q_{TOTALBIOGAS} * (1 - 0,019)$$

Para determinar la cantidad de vapor generado en la caldera en este caso, se utilizó la Ecuación 9, que se presenta a continuación:

Ecuación 9

$$\eta = \frac{\text{calor generado}}{\text{calor teórico}} = \frac{G_v * (H_v - H_a)}{G_{biogás} * PCI_{biogás}}$$

En este caso, se usa para biogás el correspondiente flujo de gas calculado para el reactor propuesto (Q_{BG}) y el PCI del mismo, siendo éste de 5095,6 kcal/m³ (Salomon, 2011), valor adoptado en este trabajo.

Una vez calculado el caudal de vapor generado en la caldera utilizando el biogás, se utilizó nuevamente al valor del consumo específico de vapor para determinar la cantidad de energía generada en este caso.

En cuanto a la vinaza obtenida como producto de la biodigestión, se la sometió a un proceso de evaporación en un sistema múltiple efecto como el utilizado para el caso de evaporación y combustión. Para resolver este sistema se utilizó nuevamente el software SICOVIN.

RESULTADOS

Concentración y combustión de vinaza

Los resultados obtenidos con SICOVIN para un caudal de vinaza de 1300 m³ y 11°Bx, se muestran en la Tabla 1.

Analizando los resultados obtenidos, se observa la necesidad de 9562,52 kg/h de vapor de calefacción, obteniéndose un caudal de 10 128,24 kg/h de vinaza concentrada a 60°Bx y de 10 003,47 kg/h de vapor del último efecto.

Luego de realizar la simulación, se procedió a calcular la cantidad de vapor que se generaría en la caldera al usar la vinaza concentrada como combustible. Para ello, se calculó en primer lugar el PCI de la vinaza 60 el cual resultó en 1566,85 kcal/kg.

A partir de este valor se calculó el caudal de vapor generado en calderas que resultó en 17 843,23 kg/h.

Luego se calculó la potencia de salida a partir de este método, la cual resultó en 2,288 MW.

En cuanto a la cantidad de K obtenida en el proceso, se calculó en 18 829 kg/día.

Tabla 1. Resultados de la simulación realizada con el software SICOVIN con sistema de evaporación de 5 efectos.

Parámetro	Unidad	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Caudal Entrada	kg/h	55250	47336,8	38798,69	29707,93	20131,71
Caudal Salida	kg/h	47336,8	38798,69	29707,93	20131,71	10128,24
Brix entrada	%	11	12,84	15,66	20,46	30,19
Brix salida	%	12,84	15,66	20,46	30,19	60,01
Caudal vapor	kg/h	7913,2	8538,11	9090,77	9576,22	10003,47
Caudal vapor calef.	kg/h	9562,52	7913,2	8538,11	9090,77	9576,22

Biodigestión de vinaza con producción de biogás

En el caso de la biodigestión se calculó en primer lugar la DQO de salida del reactor (DQOs). Este valor resultó en 30 000 g/m³.

Conocidos P_{BG} y DQO_s, se calculó la producción de biogás:

$$Q_{BIOGAS} = \frac{120000g/m^3 - 30000g/m^3}{1000g/Kg} * 10,83 \frac{m^3}{h} * 0,5 \frac{m^3}{Kg}$$

$$Q_{BIOGAS} = 487,5 \frac{m^3}{h}$$

La capacidad de producción diaria de una planta de 5 reactores será entonces:

$$Q_{TOTALBIOGAS} = 487,5 \frac{m^3}{h} * 5 * 24 \frac{h}{d}$$

$$Q_{TOTALBIOGAS} = 58500 \frac{m^3}{d}$$

Luego, teniendo en cuenta que el H₂S representa el 1,9% del biogás, el total del mismo que ingresará a la

caldera resultó en 57 388,72 m³/día.

El caudal de vapor obtenido en caldera a partir del biogás resultó en 13 700 kg/h.

La potencia en este caso fue de 1,756 MW.

La vinaza obtenida en el reactor, fue sometida también a un proceso de evaporación con el fin de disminuir su volumen. Los resultados obtenidos en este caso se muestran a continuación en la Tabla 2.

Analizando los resultados obtenidos, se observa la necesidad de 15 702 kg/h de vapor escape, obteniéndose un caudal de aproximadamente 265,2 tn/día de vinaza concentrada a 60°Bx, la cual puede comercializarse como biofertilizante líquido rico en potasio.

A continuación, se presenta la Tabla 3 con un resumen de los resultados obtenidos para cada método propuesto. Cabe aclarar que en este trabajo no se tuvo en cuenta el condensado que resulta de la evaporación de la vinaza, cuyo tratamiento puede ser abordado en posteriores trabajos de investigación.

Se puede observar que en el método de concentración y combustión se obtienen 0,532 MW más que en el caso de biodigestión.

En cuanto al vapor disponible para el proceso, se puede observar que para el primer caso existe un excedente de 8281 kg/h que podría usarse en diferentes partes del proceso, mientras que, para el caso de biodigestión, se tiene un valor de -2000 kg/h, lo que implicaría que el vapor generado a partir del biogás no es suficiente para concentrar toda la vinaza proveniente de la destilería.

Tabla 2. Resultados de la simulación con SICOVIN para un sistema de evaporación de 5 efectos, caso Biodigestión.

Parámetro	Unidad	1er Efecto	2do Efecto	3er Efecto	4to Efecto	5to Efecto
Caudal Entrada	kg/h	55250	47603,22	39284,58	30374,73	20945,14
Caudal Salida	kg/h	47603,22	39284,58	30374,73	20945,14	11048,9
Brix entrada	%	8	9,29	11,25	14,55	21,1
Brix salida	%	9,29	11,25	14,55	21,1	40
Caudal vapor	kg/h	7646,78	8318,64	8909,86	9429,59	9896,23
Caudal vapor calef.	kg/h	15702,01	7646,78	8318,64	8909,86	9429,59

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos en cada método de tratamiento.

	Concentración y combustión	Biodigestión y concentración
Potencia Eléctrica MW	2,288	1,756
Vapor (kg/h)	8281	-2000
Cenizas ricas en Potasio (tn/día)	18,829	-
Biofertilizante líquido (tn/día)	-	265,2

Por último, se puede observar que, en el caso de la combustión, además de energía se obtienen 18,829 tn/día de cenizas ricas en K que pueden luego emplearse como fertilizante. En el caso de la biodigestión, se obtienen 265,2 tn/día de un biofertilizante rico en potasio.

CONCLUSIONES

Se estudió el potencial de producción de energía y biofertilizante para aprovechar las vinazas que resultan de la industria sucro-alcoholera mediante la aplicación de dos tecnologías: Concentración y combustión de vinaza y Biodigestión con generación de biogás.

De acuerdo a lo analizado, se pudo determinar que ambas alternativas, tanto la concentración de la vinaza seguida de quema de la misma como la biodigestión con producción de biogás, permitirían aprovechar energéticamente la vinaza, obteniéndose en el primer caso energía eléctrica con una potencia de 2,288 MW y en el segundo caso, energía con una potencia de 1,756 MW.

A su vez, al comparar los dos métodos de tratamiento de vinaza se observa que ambos permiten la obtención de productos con potencial uso como biofertilizantes ricos en potasio, aunque con características y ventajas diferenciadas. El primer método conduce a la generación de 18,829 tn/día de cenizas sólidas ricas en potasio, mientras que el segundo método produce 265,2 tn/día de un biofertilizante líquido también enriquecido en dicho nutriente. Las cenizas presentan una alta concentración de potasio en forma de óxidos (K_2O), fácilmente asimilables por las plantas y de fácil almacenamiento y transporte. No obstante, su contenido en materia orgánica es prácticamente nulo y su aplicación continuada puede alterar el pH del suelo, disminuyendo su calidad a largo plazo.

En contraste, el biofertilizante líquido obtenido a partir de la digestión anaerobia de vinaza y posterior concentración, mantiene una fracción importante de materia orgánica disuelta, además de contener otros nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y micronutrientes. Si bien su concentración de potasio por unidad de masa es menor que en las cenizas, su formulación líquida facilita la aplicación mediante sistemas de fertirriego o aspersión, promoviendo una absorción más eficiente por parte de los cultivos. La elección entre vinaza líquida y sólida dependerá de las condiciones específicas del cultivo y el entorno.

Finalmente, es importante señalar que la implementación de cada una de estas tecnologías implica costos asociados, tanto operativos como de infraestructura, que pueden influir en su viabilidad económica. Si bien este trabajo no abordó el análisis económico comparativo, dicho aspecto representa una línea de investigación complementaria que podría desarrollarse en estudios futuros, con el fin de aportar criterios más integrales para la toma de decisiones en contextos productivos reales.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alderetes, C. 2016.** Calderas a Bagazo - Proyecto, operación y mantenimiento. 1ra ed. Argentina.
- Betzabet Morero. 2014.** Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. Tesis presentada para la obtención del Grado Académico de Doctora en Tecnologías Químicas. Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química. Santa Fe, Argentina
- British Petroleum. 2022.** Consumo de energía primaria mundial. Disponible en https://www.bp.com/content/dam/bp/countrysites/es_es/spain/home/pdfs/noticias/2019/infografia_sr_bp19.pdf. Consultado el día 13 de agosto de 2024.
- Cortez, I.; Brossard Pérez, I. 1997.** Experiences on vinasse disposal Part III: Combustion of vinasse fuel oil emulsions. Brazilian Journal of Chemical Engineering, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 9.
- Diaz, G.; De Boeck, G.; Cruz, M. y Paz, D. 2013.** SICOVIN V.1.0: "software" para el análisis de concentración de vinaza. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 90 (2), pag. 39-47.
- Elia Neto, A.; Shintaku, A.2009.** As boas práticas industriais. Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética. Brasília: Agência Nacional de Águas (ANA) p. 240.
- Feijóo, E., Golato M., Franck, F., Paz, D., Cárdenas, G. 2015.** Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 92 (2), pag. 23 – 32.
- Franck, F.; Golato, M.; Morales, W.; Cruz, C.; Paz, D. 2011.** Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, vol 88, nº2. Marzo de 2021.
- Leme, R.; Seabra, J. 2017.** Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/310752932_Technical-economic_assessment_of_different_biogas_upgrading_routes_from_vinasse_anaerobic_digestion_in_the_Brazilian_bioethanol_industry. Consultado el día 29 de marzo de 2024.
- Manual Biogás FAO. 2011.** Santiago de Chile. Disponible en <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. Consultado el día 22 de marzo de 2024.
- Ministerio de Energía y Minería. 2021.** Balances energéticos. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>. Consultado el día 13 de agosto de 2024.
- Molina, C.; Marquetti, F.; Quaiá, E. y Machado, W. 2020.** Arranque y seguimiento del proceso de granulación en un reactor anaeróbico utilizando vinaza como sustrato. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 97 (1), pag.52-55.
- Morandini, M., y Quaiá, E. 2013.** Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. Revista Avance Agroindustrial. Tomo 34(2), pag. 1-12.
- Ortiz, J. y Erazzú, L. 2019.** Sugar cane energy: potencial

electricity production from vinasse produced by the ethanol industry. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists. Vol. 30, pag. 1595-1602.

Perera, J. 2009. Concentración y combustión de vinazas. Ministerio de Gobierno y Justicia de la Provincia de Tucumán, Secretaría de Estado de Gobierno y Justicia, Subsecretaría de Asuntos Técnicos.

Quaia, E. 2021. Alternativas para aprovechar la vinaza como subproducto. Disponible en <https://www.eeaoc.gob.ar/?noticia=alternativas-para-aprovechar-la-vinaza-como-subproducto-de-la-actividad-sucroalcoholera>. Consultado el día 13 de abril de 2024.

Rodríguez Reis, C.; Hu, B. 2017. Vinasse from Sugarcane Ethanol Production: Better Treatment or Better

Utilization? *Frontiers in Energy Research*, v. 5, pag. 1–7.

Salomon, K.; Rocha, M. 2011. Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization. *Sugar Industry*, v. 4, p. 1–7.

Sukumar V., Manienyan V. y Sivaprakasam, S. 2015. Bio oil Production from Biomass using Pyrolysis and Upgrading. A Review. *International Journal of ChemTech Research* Vol.8, No.1, pag. 196-206.

Zamora Rueda, G.; Mistretta, M.; Gutierrez, C.; Golato, M.; Paz, D.; y Cárdenas G. 2019. Caracterización energética de vinazas de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/330872092_CARACTERIZACION_ENERGETICA_DE_VINAZAS_DE_CANA_DE_AZUCAR_DE_TUCUMAN_ARGENTINA. Consultado el día 13 de agosto de 2024.