

CANTERO S. ALEXIS R., Generación de Energía Eléctrica a partir del Biogás Proveniente de la Biodigestión Anaeróbica de Vinaza. Ingeniería Electromecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción.

[\(alexcantero86@gmail.com\)](mailto:alexcantero86@gmail.com)

RESUMEN

El presente trabajo plantea la digestión anaeróbica de vinaza como alternativa de tratamiento, dándole además un valor agregado con la producción de biogás y su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica. Esta bioelectricidad cubre los requerimientos energéticos del ingenio y el excedente puede ser destinado a la red de distribución para atender la demanda de la ciudad aledaña durante el periodo de zafra. El esquema planteado contribuye para la mejoría de la sustentabilidad del proceso productivo, pues además de tratar la vinaza, permite el gerenciamiento de los demás residuos. El proyecto reúne los requisitos para la obtención de créditos de carbono, por lo que en este tipo de emprendimiento además de las ganancias ambientales también se pueden tener beneficios económicos.

Palabras clave: etanol, vinaza, digestión anaeróbica, biogás, sustentabilidad, biofertilizante, energía renovable.

ABSTRACT

This work raises the anaerobic digestion of stillage as a treatment alternative, giving him added value in the production of biogas and its use in generating electricity. This bioelectricity cover the energy requirements of wit and surplus may be allocated to the distribution network to meet the demand of the surrounding city during the harvest. The proposed scheme contributes to improving the sustainability of the production process, as well as treating stillage, allowing the management of other waste. The project meets the requirements for obtaining carbon credits, so this type of scheme as well as environmental gains can also have economic benefits.

Keywords: ethanol, vinasse, anaerobic digestion, biogas, sustainability, bio-fertilizer, renewable energy.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de recursos energéticos de origen fósil a nivel mundial, la demanda de energía, así como las implicancias ambientales vienen estimulando investigaciones y desarrollo de tecnologías alternativas de energía. De hecho el petróleo así como sus derivados, que forjó la industrialización y direccionó la economía por siglos ya no es la mejor opción para el desarrollo sustentable de los países.

A pesar de que el Paraguay es excedentario en energías hídricas, sólo el 13% de la demanda final de energía corresponde a la electricidad, siendo al mismo tiempo deficitario de petróleos y sus derivados. Con el fomento de la producción de biocombustibles a una escala considerable, se estará propiciando un cambio en la matriz energética, pues con su utilización se estaría atenuando la alta dependencia de combustibles fósiles.

El Paraguay por ser un país eminentemente agropecuario y forestal, posee un potencial importante en la producción de combustibles alternativos en relación a los derivados fósiles. El aspecto altamente favorable para el desarrollo de la agroenergía y los biocombustibles en el Paraguay, es la cantidad de especies y variedades vegetales. El de mayor potencial sin dudas es el etanol.

La planta alcoholera de Petropar (estatal), objeto de estudio del presente trabajo, está ubicada en la localidad de Mauricio José Troche, departamento del Guairá. Amplió su capacidad de producción en el 2007 en un 60%, llegando a 240.000 litros de alcohol anhidro por día, además es considerada como el “pulmón económico” de los departamentos del Guairá, Caaguazú y Caazapá; brinda ocupación en forma directa a más de 4 mil personas, que sumados a los 2.300 cañicultores, en forma global, entre transportistas, estibadores, comedores y vendedores, da fuente de trabajo a casi 8 mil trabajadores.

Sin embargo, conviene destacar que sin las medidas necesarias las destilerías de alcohol presentan elevado potencial de polución desde el punto de vista ambiental, debido a los residuos del proceso de fabricación. El principal, no sólo por el volumen sino además por el potencial contaminante es la vinaza, retirada en una proporción aproximada de 10 a 15 litros por cada litro de alcohol producido. Históricamente han sido consideradas como un subproducto indeseable de la destilación de alcohol y aún lo siguen siendo en la mayoría de los países productores, ya que genera efectos secundarios como contaminación de ríos y fuentes de aguas subterráneas.

La biodigestión anaeróbica aparece como alternativa de tratamiento, con el valor agregado de aprovechar todo el potencial energético y nutrientes minerales de la vinaza.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

2. PRODUCCIÓN DE ETANOL EN PARAGUAY

El mundo en general se encamina hacia periodos en que los energéticos sostendrán sus precios en niveles altos. Para nuestro país este tema tiene una particular importancia en el desempeño de la economía a mediano y largo plazo: en la medida en que se tengan importaciones de derivados de petróleo en un entorno de altos precios, se incurrirá en circunstancias adversas.

A pesar de tener excedentes en generación hidroeléctrica, nuestra demanda final no sintoniza con esta energía limpia y renovable, pues el carácter de sostenibilidad de nuestra matriz energética se ve atentada por la alta dependencia de derivados del petróleo.

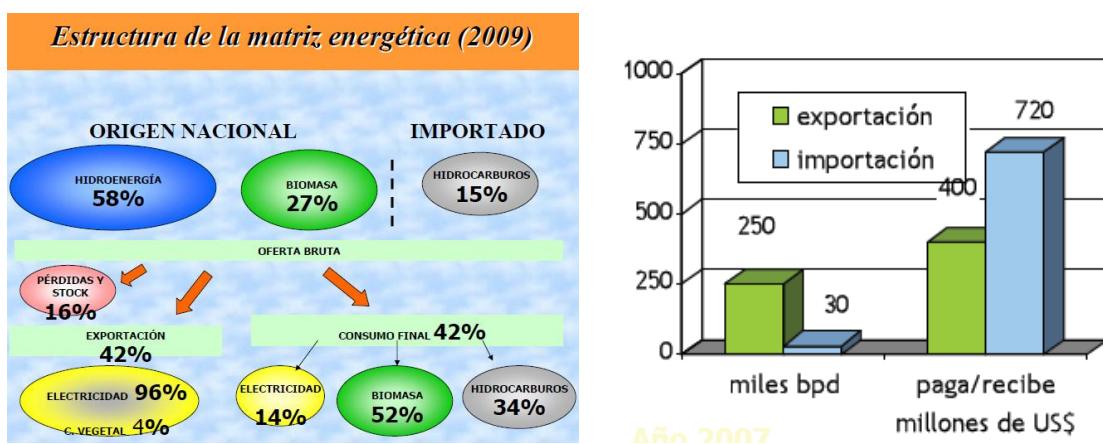


Figura 1 Matriz energética y balance monetario importación/exportación de energéticos
Fuente: VMME

Sin embargo, esta situación puede paliarse con la producción de etanol. Los fundamentos para impulsar esta alternativa se basan en el aseguramiento de productos energéticos como estrategia del país, posibilidad mitigar la contaminación ambiental y creación de empleos.

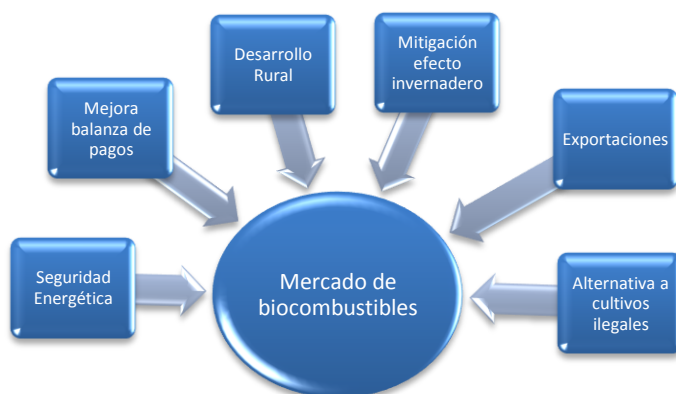


Figura 2 Fundamentos para la producción de etanol
Fuente: Elaboración propia

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

El Plan Nacional de Biocombustibles pretende alcanzar para el 2015:

- US\$ 400.000.000 en exportaciones.
- US\$ 40.000.000 en ahorro anual de egreso de divisas por sustitución de gasolina.
- US\$ 1.000 millones en inversiones
- 140.000 hectáreas de nuevos cultivos de caña de azúcar.
- 140.000 nuevos empleos directos en las áreas agrícola, industrial y transporte.

Con la cadena productiva del etanol y sus articulaciones con clusters el Paraguay podría fundamentar su desarrollo sostenible, sostenido y dinámico, produciendo para la exportación y también para sustituir en el mercado local a los nocivos y costosos energéticos de origen fósil. De esta forma el país puede ser ejemplo de innovación en el mundo pos-petróleo, pues los biocombustibles junto con la hidroelectricidad pueden constituir la base del desarrollo nacional dentro de la economía de bajo carbono del siglo 21.

3. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA ALCOHOLERA

En los últimos años el fomento a la producción de etanol ha dado sus frutos, pues gracias a las inversiones de los ingenios en la creación de nuevas destilerías y ampliación de capacidad, se registró un incremento en la producción de 167% entre el 2006 y 2010.

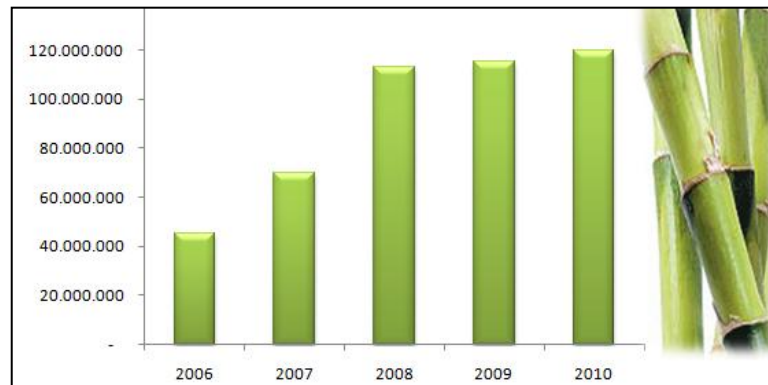


Figura 3 Incremento en la producción de etanol
Fuente: Elaboración propia en base a datos del MIC

Con este aumento en la producción las atenciones se deben centrar en los residuos, pues sin las medidas necesarias las destilerías presentan elevado potencial de polución ambiental, por ende se torna interesante analizar la posibilidad de utilización y control de los residuos del proceso de fabricación.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

Efectivamente una de las características peculiares de la industria alcoazucarera es el aprovechamiento de muchos de sus residuos, esto debido a las cantidades en que son generadas, sobre todo por el contenido energético y fuente de materia orgánica. Así estos residuos pueden ser vistos más bien como subproductos, dentro de los mismos se puede citar: el bagazo, ceniza de caldera y torta de filtro (cachaza).

3.1 Vinaza

Otro de los residuos que merece principal atención es la vinaza, no sólo por el volumen generado sino también por el potencial de polución. Es resultante de la producción de alcohol, después de la fermentación de mosto y la destilación de vino, generado en una proporción de 13 a 15 litros por litro de alcohol.

Constituye un líquido de color oscuro, que puede variar desde carmelita hasta casi negro, de olor fuerte, temperatura cercana a los 100°C, pH medianamente ácido. Están compuestas por un 93% de agua, 2% de compuestos inorgánicos (potasio, calcio, sulfatos, cloruros, nitrógeno, fósforo, etc.) y un 5% de compuestos orgánicos.

Tabla 1 Características físico-químicas de la vinaza

Parámetros	Materia prima para fabricación de etanol	
	Caldo	Melaza
pH	3,7 -4,6	4,2-5,0
Temperatura (°C)	80-100	80-100
DBO (mg/l O ₂)	6.000-22.000	30.000-45.000
DQO (mg/l O ₂)	15.000-33.000	60.000-75.000

Fuente: Adaptado de Lamo.

La generación nominal de vinaza de la alcoholera estudiada equivale al poder contaminante de aguas residuales de una población de 1.000.000 habitantes, lo que da una idea muy clara de la magnitud del problema.



Demanda Química de Oxígeno (DQO)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)



= 54 g/día DBO₅ por habitante



15 gDBO₅/l

Carga orgánica: 54.000.000 g/día

1.000.000 habitantes

Figura 4 Poder contaminante de la fábrica equivalente en número de habitantes.

Fuente: Elaboración propia

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

Este poder contaminante hizo que la vinaza históricamente sea considerado un subproducto indeseable de la destilación de alcohol, y aún sigue acarreando innumerables problemas ecológicos, sociales, políticos y económicos por su eliminación en lechos de agua, registrándose un vasto historial, tanto a nivel regional como local, de disputas que envuelven la fábrica y población.

En el Paraguay, la práctica más difundida de los ingenios de gran porte es la fertirrigación, en la mayoría de los casos con ganancia de fertilidad del suelo, sin atentar contra el medio ambiente en corto plazo, sin embargo se puede conjeturar que con ésta práctica el principal objetivo es liberarse del residuo incómodo y peligroso de forma rápida y económica posible, sin causar mayores daños paralelos.

4. BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica se presenta como otra de las alternativas, debido a la alta concentración de DQO se puede obtener un volumen considerable de biogás que puede ser aprovechado para la generación de electricidad, pero la principal ventaja es la disminución del potencial de contaminación.

Este biogás tiene un contenido de CO₂ entre 27% y 44%, metano entre 50% y 70%, confiriéndole éste último el potencial energético.

Comparando con el método convencional de tratamiento y desde el punto de vista de implementación de tecnologías sustentables, el proceso anaeróbico tiene las siguientes ventajas:

- Produce energía útil en vez de consumir
- Alto rendimiento en la degradación de DQO y DBO₅
- Lodo anaeróbico que conserva los nutrientes de la vinaza
- Puede ser aplicado en prácticamente cualquier lugar y en cualquier escala, pues altas tasas de conversión pueden ser obtenidas con los modernos sistemas de tratamiento, requiriendo relativamente poco espacio.

Esta alternativa se torna viable a partir de los avances en reactores anaeróbicos, las consideradas de tercera generación son más compactas y eficientes, lo que repercute en un menor costo operativo e inversión necesaria.

El reactor IC (Circulación Interna) es el que contribuyó a aumentar la viabilidad para la implementación en destilerías, entre las principales ventajas se tiene: menor susceptibilidad a sobrecargas orgánicas, choques de temperatura, productos tóxicos, menor consumo de insumos para ajuste de pH, menor área ocupada y principalmente menor costo de implantación.

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA
BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA**

5. DISPOSICIÓN ACTUAL DE VINAZA EN EL CASO DE ESTUDIO

El ingenio estudiado tiene una instalación de metanización y post-tratamiento por aeración. El sistema se diseñó originalmente con vistas a recibir dos tipos de efluentes: aguas fuertemente cargadas de DQO Y DBO₅ (vinaza, flegmaza, lavado de cubas), y aguas poco cargadas de DQO y DBO₅ (aguas servidas, de lavado). Con el esquema original se aseguraba la reducción de la contaminación contenida en los efluentes de la destilería hasta valores aceptables por un curso receptor (Río Tebicuarymi).

El sistema original estuvo en operación por el periodo de 2 zafras, el mismo cumplía los valores especificados de diseño en cuanto a producción de gas y reducción de la contaminación del efluente.

Sin embargo, el principal inconveniente técnico fue la no utilización del biogás como estaba previsto y el lodo resultante del complejo proceso de deshidratación mecánica no era aprovechado como fertilizante por los productores. Todo esto generó un sistema oneroso, pues los costos de operación y mantenimiento (polímeros, cal, personal, electricidad) no se compensaban al ser quemado el gas en antorchas y el lodo no aprovechado.

La decisión fue modificar el esquema de funcionamiento, desactivando el sistema anaeróbico y deshidratación de lodos, recurriéndose a las piletas de sacrificio para el almacenamiento de efluentes. Dichas piletas realizaban la misma reducción de DQO que los reactores anaeróbicos. Con el almacenamiento de grandes cantidades y la profundidad adecuada se comportaban como lagunas facultativas (aerobio en la superficie y anaeróbico en el fondo), sin embargo, demandó gran superficie (aproximadamente 20 Has en total).

A partir del efluente captado de las piletas se realiza la descontaminación necesaria para el vertido al río, manteniendo inalterable el esquema aeróbico. En la figura 5 se puede ver la modificación del sistema original, técnicamente seguía cumpliendo los requerimientos y a un costo menor, sin embargo, generaba olores desagradables, que en ese momento no causaban mayores problemas al no haber gran población en los alrededores.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

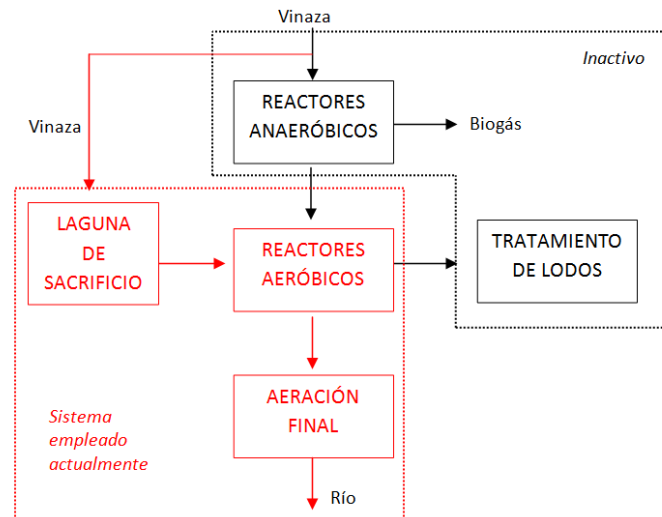


Figura 5 Esquema actual del tratamiento de vinaza

Fuente: Elaboración propia

Tras la ampliación industrial, la generación de vinaza dobla la capacidad del sistema de tratamiento, requiriéndose ampliar la superficie de piletas. En la siguiente figura se observa la destilería, lagunas llenas de vinaza y las nuevas requeridas, el principal inconveniente es la posibilidad de desborde de las mismas en periodos de intensa lluvia y picos de producción. Este desborde afectaría el cuerpo de agua cercano, incluso en el 2010 la empresa registra antecedentes sobre el tema.



Figura 6 Vista satelital de la fábrica

Fuente: Google Earth

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

No menos importante es el efecto en la calidad del aire, la población en los alrededores crece, y tanto la zona urbana de Mauricio J. Troche como las comunidades vecinas se ven afectadas por los olores desagradables despididos a consecuencia del tratamiento actual de vinaza.

6. REACTIVACIÓN DE LA DIGESTION ANAERÓBICA

El trabajo plantea la posibilidad de reactivar los digestores (pues ya se tienen instalado las obras civiles y el montaje electromecánico) para formar parte de una propuesta de disposición sustentable de los residuos de la industria.

El resultado de una inspección visual del sistema y los equipos que la componen, así como el relevamiento de los datos técnicos permiten identificar las readecuaciones necesarias para la reactivación. Los digestores necesitan protección anticorrosiva y verificación del espesor a través de un ensayo de ultrasonido, la base de hormigón no presenta fisuras según la inspección visual, la hipótesis puede ser verificada con un ensayo de patología del hormigón, los intercambiadores de calor requieren mantenimiento general (cambio de empaquetaduras), así como instrumentos para medición, control y protección. Las obras civiles un revestimiento antiácido y entre las tuberías se proyecta cambiar las de transporte de biogás, actualmente de hierro fundido, por tuberías de polietileno de alta densidad (PEHD). Entre los equipos a adquirir se encuentran motobombas, gasómetros, filtros para H_2S y sopladores para biogás.

Además de lo citado anteriormente se deben readecuar las instalaciones eléctricas de la sección y adquirir instrumentos de laboratorio. La sección aeróbica no requiere cambio alguno, la misma está en funcionamiento y es objeto de mantenimiento anual.

7. ESQUEMA PLANTEADO

Una vez realizada todas las adecuaciones necesarias, el Sistema Anaeróbico estará en condiciones de recibir el efluente de la destilería y producir biogás. Pero la capacidad de biodigestores instalados actualmente permite tratar sólo $1.800 \text{ m}^3/\text{día}$ de vinaza, que corresponde a la mitad de la generación nominal. Como la producción de etanol de esta fábrica está lejos de la nominal, la reactivación permitiría tratar 83% del volumen en 6 meses, pudiendo el remanente ser destinado a las piletas.

Sin embargo, esta opción no sería sustentable, además hay que tener en cuenta una cuestión muy importante, al no producirse alcohol cerca de la

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

cantidad nominal la empresa deja de tener márgenes para la cual fue proyectada. Por esta razón a lo largo del trabajo para los cálculos se considera la producción nominal de alcohol, es decir, 240.000 litros por día durante 6 meses. Así, la generación de vinaza supera ampliamente la capacidad de los biodigestores, por lo que es necesario agregar más unidades.

El esquema planteado en este trabajo consiste en agregar los digestores necesarios, a partir del biogás generar energía eléctrica y el lodo anaeróbico en exceso, según el volumen, incorporar con otros residuos (bagazo, cachaza, cenizas) para compostaje, prescindiendo así de la deshidratación mecánica. La vinaza digerida se destina a un tratamiento de aeración para luego ser vertido al cauce hídrico.

7.1 Cálculo de biodigestores

Para la elección del tipo de digestor adicional son limitantes los siguientes factores: inversión necesaria, eficiencia en la remoción de DQO-DBO, terreno para emplazamiento, volumen, costo operativo y de mantenimiento.

Parámetros del efluente

Caudal de vinaza Q=	1.800 m ³ /día	SST	= 500 mg/l
DQO	= 33 kg/m ³	Temperatura	= 85°C
DBO ₅	= 19 kg/m ³	pH	= 4,5

En base a los parámetros anteriores y las ecuaciones que modelan la digestión anaeróbica se elaboró la siguiente tabla, comparando dos tipos de digestores modernos, considerando las limitantes de cada uno.

Tabla 2 Parámetros calculados para el UASB y reactor IC

LÍMITES DEL REACTOR	UNIDAD	TIPOS	
		UASB	IC
Tasa de carga orgánica (TCO)	kgDQO/m ³ r.día	4 a 16	20 a 38
TRH	h	6 a 18	2 a 10
Velocidad ascendente	m/h	0,5 a 1	5 a 10
CALCULOS			
Carga orgánica	kgDQO/día	59400	
Valor asumido de TCO	kgDQO/m ³ r.día	14	26
Volumen del reactor	m ³	4.243	2.285
Altura del reactor	m	5	30
TRH	h	6,8	3,7
Area ocupada	m ²	780	77
Diámetro	m	32	10

Fuente: Elaboración propia

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

Las velocidades ascensoriales del líquido y biogás están limitadas en el UASB para evitar arrastre de lodo, por lo que el TRH es alto, teniéndose así reactores bajos que ocupan un área considerable. La tasa de carga orgánica máxima soportado por cada uno de estos reactores hace que el UASB tenga un volumen considerable, que implica mayor inversión.

Para este proyecto se escoge 01 (un) Reactor Anaerobio de Circulación Interna (IC), de 2.300 m³ de volumen, 30 metros de altura y 10 m de diámetro. Esta elección supone una inversión menor comparando con el volumen que requiere el otro digestor, el terreno necesario para el emplazamiento es tan solo de 77 m². El costo operativo se reduce sustancialmente al necesitar menos insumos para la neutralización, ya que su sistema de circulación interna permite una autoregulación que mantiene la alcalinidad necesaria, así como disminuir los riesgos de toxicidad y choques de carga orgánica. No menos importante es el casi nulo mantenimiento del sistema, debido a los materiales en que están contruidos y la relativa sencillez de las instalaciones.

7.2 Cantidad de biogás y electricidad generada

El modelo matemático más aceptado y utilizado es el ADM1 (Anaerobic Digestion Model N°1), implementado en diferentes softwares comerciales, OESTE, GPS-X, SIMBA y AQUASIM, siendo este último el más utilizado para determinar la producción de biogás y tenor de metano.

Si bien están disponibles dichos softwares, la implementación de los modelos de bioproceso como ADM1 es muy compleja y pueden conducir fácilmente a errores. Además es necesario conocer los parámetros del sustrato y determinar constantes cinéticas relacionados con el proceso de digestión anaerobia, lo que escapa al alcance del trabajo.

Ante esta situación se recurre a un cálculo más sencillo pero también confiable, incluso utilizado por los propios desarrolladores de digestores Methax-Biopaq, esta metodología de cálculo se basa en la eficiencia de remoción del digestor. Teniendo en cuenta la cantidad de materia orgánica que degrada el digestor se calcula la generación de biogás a partir del factor de conversión, dato obtenido en estudios experimentales de Methax-Codistil a partir de planta piloto.

Se considera el caudal nominal de vinaza y la Demanda Química de Oxígeno igual a 33 kg/m³.

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA
BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA**

CAUDAL: 3.600 m³/día de vinaza

Carga orgánica

$$CO = VVG \cdot DQO$$

CO: carga orgánica (kg.DQO/día)

DQO: 40 kg/m³ (Bibliografía), planta de Petropar 33 kg/m³

$$CO = (3.600)(33) = 118.800 \frac{kg_{DQO}}{día}$$

Producción de biogás

$$PB = CO \cdot E \cdot F$$

E: eficiencia de remoción de DQO del proceso = 75%

F: factor de conversión de biogás por DQO removido = 0.45 N.m³/kgDQO removido

$$PB = (118.800)(0.75)(0.45) = 40.095 \frac{Nm^3}{día}$$

Considerando el rendimiento combinado de ambos reactores se tiene **38.760 Nm³/día** (condiciones Normales: 0°C y 1 atm).

Entre las alternativas de conversión se destaca el motor de combustión interna apuntando a la generación de electricidad, por ser robusto, compacto, requiere menor inversión, es menos susceptible a las condiciones ambientales y están preparados para un porcentaje de H₂S presente en el biogás.

En el trabajo se opta por seleccionar un determinado tipo de grupo generador en base a ciertos parámetros y a partir de allí según el volumen de biogás determinar las unidades necesarias y la potencia que entregará la central térmica.

Se toma la proporción de gases como sigue: 50% CH₄, 45% CO₂ y 1% H₂S. En base a esta composición del biogás se determina el número de metano, aproximadamente 145. Teniendo en cuenta el poder calorífico inferior se determina el nivel máximo de H₂S aceptable, con estos datos y la temperatura del agua del posenfriador disponible se determina el motor siguiendo las guías de uso de combustible publicadas por Caterpillar.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

CATERPILLAR
METHANE NUMBER CALCULATION PROGRAM Version 5.00

Gaseous fuel analysis

METHANE	CH4:	50.000	HEPTANE	C7H16:	0.000
ETHANE	C2H6:	0.000	OCTANE	C8H18:	0.000
ETHYLENE	C2H4:	0.000	NONANE	C9H20:	0.000
PROPANE	C3H8:	0.000	CARBON MONOXIDE	CO:	0.000
PROPYLENE	C3H6:	0.000	CARBON DIOXIDE	CO2:	45.000
ISOBUTANE	ISOC4H10:	0.000	HYDROGEN	H2:	0.000
NORBUTANE	NORC4H10:	0.000	OXYGEN	O2:	0.500
ISOPENTANE	ISOC5H12:	0.000	NITROGEN	N2:	3.500
NORPENTANE	NORC5H12:	0.000	HELIUM	HE:	0.000
NEOPENTANE	NEOC5H12:	0.000	HYDROGEN SULFIDE	H2S:	1.000
HEXANE	C6H14:	0.000			
				TOTAL (Volume %)	: 100.000

CATERPILLAR METHANE NUMBER: 145.2 ←

COMPRESSIBILITY FACTOR: 0.997

STOICH A/F RATIO (Vol/Vol): 4.765

STOICH A/F RATIO (Mass/Mass): 4.719

SPECIFIC GRAVITY (REL TO AIR): 1.010

RELATIVE POWER CAPABILITY TO 905 BTU/FT3 (35.64 MJ/NM3) FUEL: 92%

	BTU/FT3	MJ/NM3
LOWER HEATING VALUE:	456	17.96
HIGHER HEATING VALUE:	508	19.99
WOBBE INDEX:	454	17.88

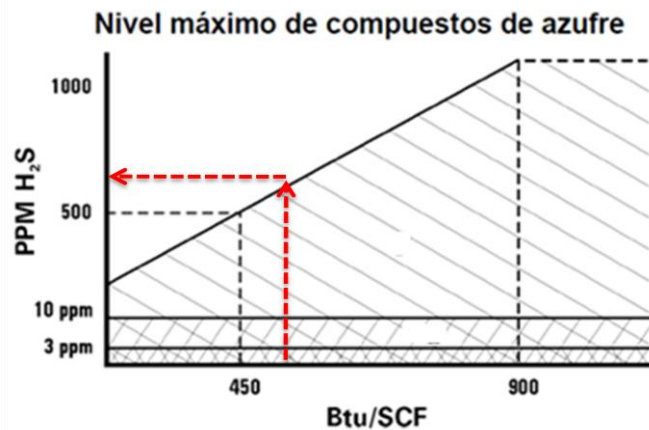


Figura 7 Parámetros para la selección del grupo generador
Fuente: Programa Caterpillar a partir de datos del proyecto

El motogenerador escogido es G3512 LE SCAC, número de metano mínimo 140, baja presión de gas y rango PCI 450 a 600 Btu/scf. El sistema regulador de presión requiere combustible en un rango de 35 a 350 mbar y temperatura entre 65°C y -25°C. A partir de la ficha técnica se elabora la siguiente tabla.

Tabla 3 Potencia de la central térmica

Generación de bioelectricidad	
Producción de biogás	1.615 Nm ³ /h
Consumo horario del motor	391 Nm ³ /h
Cantidad	4
Potencia total	4x770=3.080 kW

Fuente: Elaboración propia

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

En este ingenio 96% de la demanda energética es cubierto con la combustión de bagazo, se requiere otro turbogenerador para la autosuficiencia energética, pues la capacidad de la caldera y la cantidad de combustible están acordes a este requerimiento. Se analizó esta situación por el hecho de que con el ingenio autoabastecido la totalidad de electricidad generada a partir de vinaza sería destinada a la red.



Figura 8 Requerimientos energéticos del ingenio

En este trabajo se considera la situación actual (Fig. 8) en donde esta potencia atendería al autoabastecimiento de la fábrica y el excedente puede ser destinado a la red. Las ventajas técnicas serían tanto para la industria como para la Ande, ya que con la configuración actual del alimentador se tiene una subtensión en el punto, según el perfil de tensión mostrado en la figura 8, esta generación distribuida supone mejorar dicha condición.

Además sería estratégico para la alcoholera, al no depender de agentes externos en ese sentido. La energía es un bien cada vez más escaso y el costo final con la que llega puede sufrir un revés interesante en un horizonte dado. La posibilidad de venta del excedente eléctrico a la Ande puede representar beneficios cada vez mayores para la alcoholera, atendiendo los planes de integración energética del país a nivel regional.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

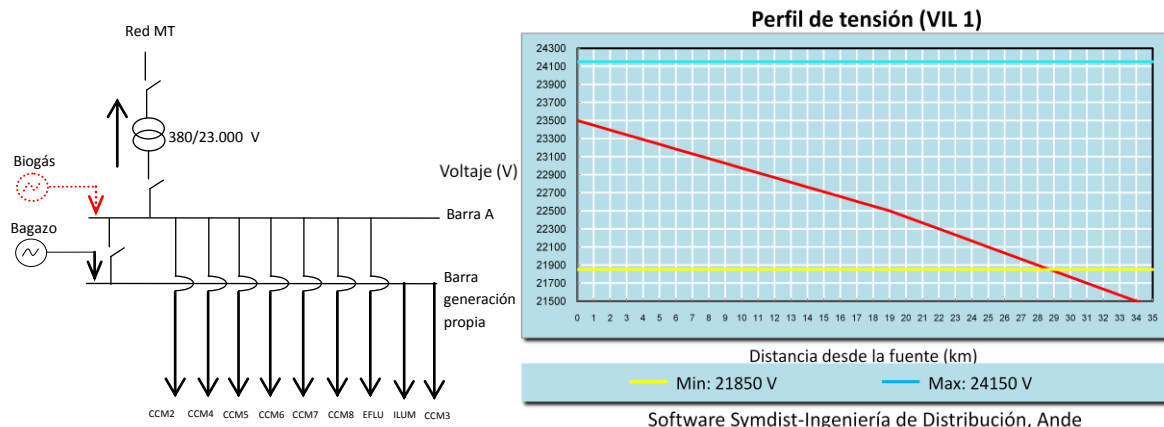


Figura 9 Esquema eléctrico de la industria y perfil de tensión del alimentador
Fuente: Elaboración propia y Perfil obtenido de la simulación en Cymdist-Ingeniería de distribución, Ande.

7.3 Vinaza digerida

Del digestor vuelve a salir el efluente aproximadamente en la misma cantidad, pero esta vez con una disminución significativa en DQO y DBO₅, pH neutro y temperatura reducida en 60%. Además este líquido sigue conservando todos los nutrientes de la vinaza (fósforo, potasio y nitrógeno) por lo que sería ideal para la fertirrigación. Sin embargo, atendiendo el esquema agrícola de esta destilería (cultivos alejados y dispersos) se opta por seguir con el post-tratamiento de aeración para luego verterlo al río.

7.4 Lodo en exceso

El principal inconveniente para el compostaje de bagazo, ceniza, torta de filtro y vinaza es el volumen de este último, para la cantidad dada de los otros residuos apenas un porcentaje de la vinaza puede ser usada. De allí la ventaja de utilizar el lodo en exceso, con un volumen significativamente menor y que sigue teniendo una adecuada cantidad de nutrimentos, sobre todo nitrógeno y potasio.

La propuesta del trabajo es conformar pilas con estos residuos, agregando el lodo para aportar la humedad necesaria, microorganismos activos (es un fango activo), así como nutrientes que los otros no poseen en la medida necesaria. Con el balance de masa y humedad se puede proceder a la mezcla y aireación mediante volteos diarios utilizando mezcladora para compost, creando así las condiciones necesarias para el crecimiento de microorganismos los cuales descomponen los residuos hasta transformarlos en abono orgánico.

La inversión para el productor será menor que el abonado tradicional y con la producción anual sería factible atender 6.000 Has/año, justamente la extensión cultivada en la zona de influencia.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

7.5 Créditos de carbono

La actividad del proyecto propuesto involucra evitar liberación de metano en el tratamiento de aguas residuales mediante la biodigestión anaeróbica, en este caso de vinaza. La metodología de monitoreo y línea de base de pequeña escala aprobada y aplicada al componente de la actividad de proyecto relacionado con evitar el metano es la **Versión 13 de AMS-III.H.: “Recuperación de metano en el tratamiento de aguas residuales”**. Teniendo en cuenta el párrafo 20 de AMS III.H versión 13, para determinación de la línea base, se calcula el potencial de generación de metano.

Se considera además el CO₂ emitido por los motogeneradores, el mismo se calcula considerando la combustión completa de la mezcla metano-aire. Se tiene así una captura efectiva de 30.053 Ton de CO₂eq.

Tabla 4 Ton CO₂ no emitido

TON/AÑO DURANTE 7 AÑOS		
CO ₂ eq no emitido en piletas	CO ₂ emitido por motor	Captura efectiva CO ₂ eq
36.533	6.480	30.053

Fuente: Elaboración propia

8. RESULTADOS

En resumen se consigue 167 m³ biogás/m³ etanol, aproximadamente 1 kW de potencia por capacidad de molienda instalada (Ton/día). Biofertilizante en una proporción de 23 kg día/Ton de caña procesada al día. El esquema planteado permite aprovechar primero el potencial energético de los residuos y luego destinarlos al campo devolviéndole al suelo los nutrientes minerales y orgánicos, teniendo así prácticamente un ciclo de cero residuos. En la figura 9 se plasma la propuesta en base a los resultados obtenidos en este trabajo.

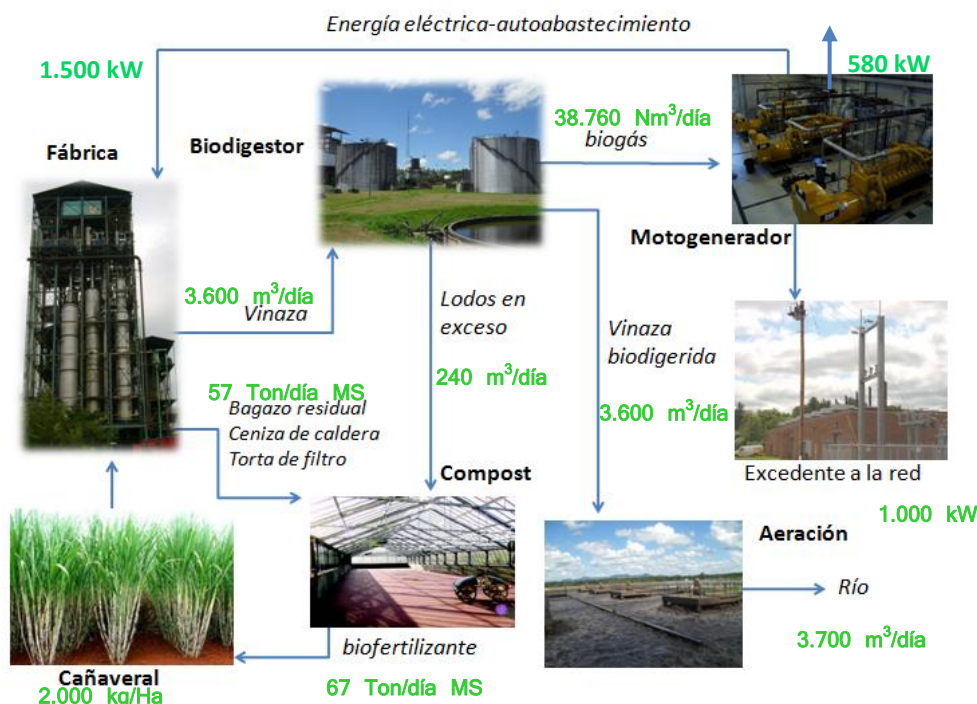


Figura 10 Esquema planteado y resultados obtenidos

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

9. ANÁLISIS ECONÓMICO-FINANCIERO

El capital necesario asciende a 6.063.090 US\$, se considera financiamiento externo de 30% a una tasa de interés de 10% anual y un plazo de 10 años con periodo de gracia de 1 año. El principal ingreso es en concepto de biofertilizantes, debido al volumen manejado y el ínfimo costo de transportar los residuos a la zona de compostaje. Considerando un horizonte de 10 años, el proyecto es viable económicamente, ya que la Tasa Interna de Retorno igual a 14,19%, mayor a la Tasa Mínima Atractiva de Retorno de 10%, el VAN es positivo e igual a 1.091.121 US\$.

Tabla 5 Flujo de fondos con financiamiento externo

AÑO	INVERSIONES FIJAS	CAPITAL DE TRABAJO	AMORT. DEUDA	DEPRECIACION	AMORTIZACION ACT. FIJ. INT.	UTILIDAD NETA	FLUJO DE FONDOS
0	(4.202.990)	(140.636)					(4.343.626)
1		(11.627)	(206.678)	390.440	38.802	(1.925)	209.012
2		(23.254)	(206.678)	390.440	38.802	138.650	337.959
3			(206.678)	390.440	38.802	716.106	938.670
4			(206.678)	390.440	38.802	735.368	957.933
5			(206.678)	390.440	38.802	754.631	977.195
6			(206.678)	390.440		810.057	993.819
7			(206.678)	390.440		829.319	1.013.081
8			(206.678)	390.440		848.581	1.032.344
9			(206.678)	390.440		867.844	1.051.606
10	1.116.600	175.517		390.440		887.106	2.569.663

Fuente: Elaboración propia

A pesar de ser menor el ingreso en lo que respecta a bioelectricidad, el análisis de sensibilidad muestra como un incremento del 30% en la tarifa incrementa 1.6 puntos porcentuales la Tasa Interna de Retorno. Así mismo, considerando por separado la venta de excedentes, con un precio igual al precio de venta de la Ande, se aumenta la Tasa Interna de Retorno en 1,45 puntos. Debido a que estas tendencias se pueden dar, se considera estratégico esta generación de electricidad.

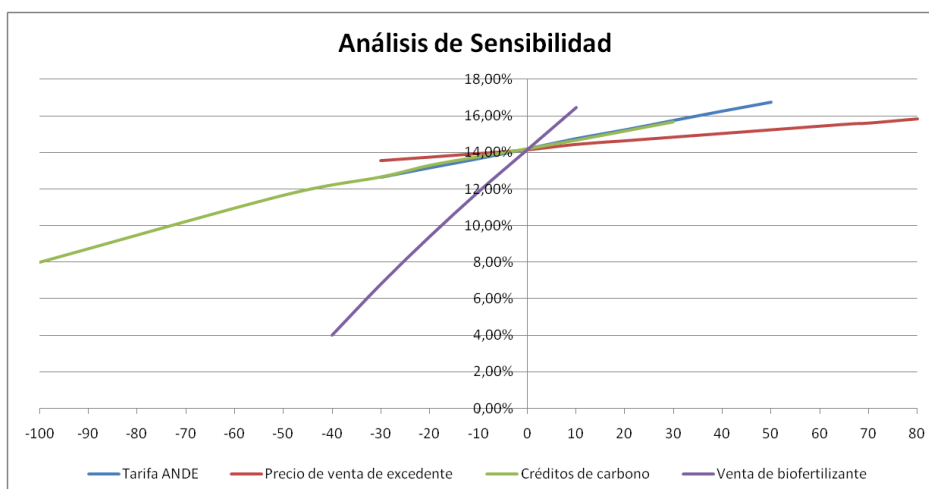


Figura 11 Análisis de sensibilidad

Fuente: Elaboración propia

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA
BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA**

10. CONCLUSIONES

La producción de etanol en el país aparece como una alternativa a la dependencia de combustibles fósiles. Los argumentos que impulsan esta producción son: mitigación de la contaminación ambiental, generación de empleos y reducción de fuga de divisas.

Sin embargo, el fomento a su producción hace que las atenciones se centren hacia el aumento de residuos, principalmente vinaza. Existen diversas alternativas de tratamiento de vinaza y la selección de cada una de ellas envuelve relaciones complejas al involucrar sociedad y medio ambiente. La fertirrigación representó un gran avance, sin embargo, se constituyó en gran medida como un paliativo al problema de disposición de vinaza.

Para el ingenio analizado la digestión anaeróbica de vinaza colabora directamente con el desarrollo sustentable explotando al máximo una fuente renovable de energía.

El esquema planteado en este trabajo permite el gerenciamiento de todos los residuos, pues el lodo anaeróbico subproducto de la digestión, que aún preserva los nutrientes de la vinaza y con un volumen significativamente menor, puede ser incorporado al bagazo residual, torta de filtro y cenizas de caldera para su compostaje, teniendo así un abono orgánico de alta calidad.

La utilización de biogás en motores de combustión interna apuntado a la generación de energía eléctrica se presentó como la opción más interesante para su conversión energética. La potencia instalada en la central térmica permite atender la demanda eléctrica de la industria y el excedente cubre los requerimientos de la ciudad aledaña durante el periodo de zafra. Además de las ventajas técnicas, esta generación distribuida representa para la Ande una posibilidad de negocio, pues la Ley N° 3.009/06 PEE le permite adquirir el excedente a un precio que es tan solo un porcentaje de la categoría tarifaria industrial, para luego distribuirla a residencias y comercios en las que el pliego tarifario es mayor.

Al cambiar el esquema actual de tratamiento de vinaza se minimiza la emisión de metano a la atmósfera, gas de efecto invernadero incluido en el Protocolo de Kyoto, por lo que el proyecto puede tener réditos económicos con la obtención de créditos de carbono. La superficie destinada al almacenamiento de vinaza (20 Hectáreas aproximadamente) puede ser recuperada y aprovechada para la plantación de caña de azúcar.

El aspecto motivador para la implementación de este tipo de proyecto debe ser la misma ganancia ambiental, pero además la propuesta planteada es viable económicamente, colaborando en corto plazo para dicha viabilidad la venta de abono orgánico, los ingresos en concepto de energía eléctrica se consideran estratégicos a mediano y largo plazo.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS PROVENIENTE DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZA

Es necesario reestructurar el pliego tarifario para Productores Independientes de Energía Eléctrica, teniendo como referencia la fuente de energía primaria, es decir, diferenciado si es solar, biomasa, eólico, etc., de modo a incentivar la inserción de energías alternativas a la red de energía eléctrica. Actualmente el pliego para cogeneradores tiene como referencia la energía hidráulica.

Otro aspecto a tener en cuenta es la necesidad de ampliar el periodo de zafra y aún mejor extenderlo durante todo el año, esto podría darse con la introducción de nuevas variedades de caña de azúcar con maduración super-tempranera y super-tardías. Además evaluar la posibilidad de incorporar una materia prima complementaria (sorgo sacarino, maíz, etc) siguiendo ejemplo de otros ingenios nacionales que operan de esta manera. Así la disponibilidad de bioelectricidad sería a lo largo del año, empleo permanente, mayor ingreso económico para el productor y la fábrica.

11. BIBLIOGRAFÍA

FRIEDMANN A., PENNER R., (2009), *Biocombustibles Alternativa de negocios verdes-Programa Paraguay Vende para la Agencia del Gobierno de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID)*.

LOVERA, L. M. (2010), *Biocombustibles en el Paraguay, situación actual y perspectivas - V Seminario Latinoamericano y del Caribe de Biocombustibles*. Vice Ministerio de Minas y Energía, Asunción-Paraguay.

REDIEX (2008), *Mesa Sectorial de Biocombustibles*. Ministerio de Industria y Comercio, Asunción-Paraguay.

ALCOHOLERA PETROPAR (2011), *Censo de cañicultores y base de datos de la empresa*.

SALOMON, K., R. (2007), *Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade, Itajubá, 219 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá*.

BEDOLLA, L. y VALDÉZ, Z. (1990), *Constituyentes y propiedades físico-químicas de las vinazas de destilerías cubanas*.

OXILIA, V. (2009), *Energía renovable en América Latina y el Caribe. Primer Encuentro Técnico-Observatorio de Energía Renovable para América Latina y el Caribe – Medellín*.

OLADE (2009), *Organización Latinoamericana de Energía, Informe de Estadísticas Energéticas*. Descarga gratuita en: www.olade.org

CANTERO, R. (2010), *Informe Anual, Campo Experimental de Caña de Azúcar-Institutuyo Paraguayo de Tecnología Agraria*. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Natalicio Talavera (Guairá).

LAMO, P. (1991), *Sistema produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais – METHAX/BIOPAQ – CODISTIL – Piracicaba*.