

---

# **APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR COMO SOLUCIÓN DE PROBLEMAS AMBIENTALES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA VENEZOLANA**

Torrebalba Hely

Centro de Investigaciones del estado para la Producción Experimental  
Agroindustrial (CIEPE), estado Yaracuy  
htorrealba@ciepe.gob.ve

## **Resumen**

En Venezuela, la industria azucarera procesó 8.134.111 t de caña de azúcar en el año 2011. El procesamiento de la caña de azúcar genera residuos de diversa índole, destacándose el bagazo por los grandes volúmenes producidos y sus consecuentes problemas ambientales. Se estima que la producción de 100 kg de azúcar genera 270 kg de bagazo. El flujo de residuos ocasiona problemas en la industria debido a las dificultades en el manejo, almacenamiento y disposición final de estos materiales. Diversos estudios han mostrado que el bagazo presenta características que lo hacen potencialmente útil en la producción de energía, debido a que su poder calorífico es de unas 1850 Kcal/kg. El estudio realizado tiene por objetivo evaluar la producción de energía a partir del bagazo, obtenida mediante procesos térmicos y bioquímicos, utilizando como indicador la razón de energía neta para ambas vías de obtención. Para ello, se determinan los flujos de energía de entrada a cada etapa del sistema, así como la energía que entrega cada proceso. La energía puede ser obtenida por la combustión directa del material para producir calor en una caldera o, por vía bioquímica, mediante la fermentación para obtención de etanol carburante. La determinación del indicador muestra que el aprovechamiento del bagazo para la obtención de energía por procesos térmicos tiene un menor desempeño que la fermentación alcohólica, constituyéndose ésta última en una opción conveniente para el manejo ambiental de este residuo.

**Palabras clave:** aprovechamiento residuos, bagazo, razón de energía neta, combustión.

## Introducción

El procesamiento de la caña de azúcar genera residuos de diversa índole, destacándose el bagazo por los grandes volúmenes producidos y sus consecuentes problemas ambientales. En Venezuela, en el año 2011, la industria azucarera procesó 8.134.111 t de caña de azúcar (Fedeagro, 2011). Se estima que la producción de 100 kg de azúcar genera 270 kg de bagazo (Díez y Garrido, 2012), lo cual permite estimar un flujo de residuos de 2.489.038 t bagazo/año. El flujo de residuos ocasiona problemas en la industria debido a las dificultades en el manejo, almacenamiento y disposición final de estos materiales. Diversos estudios han mostrado que el bagazo de la caña presenta características que lo hacen potencialmente útil en la producción de energía, debido a que su poder calorífico es de unas 1850 Kcal/kg. Las tecnologías de obtención de energía son ampliamente conocidas y comprenden procesos termoquímicos y biológicos de transformación [Díez y Garrido, (2012); Avella, (2007)]. Entre los usos más extendidos se encuentra la combustión directa del bagazo en calderas para la obtención de vapor, destinado generalmente a usos industriales o, en muchos casos, a la producción de energía eléctrica. Otra de las opciones más estudiadas es la transformación bioquímica, mediante la fermentación del bagazo para la producción de etanol, un alcohol utilizado como carburante en forma directa en motores de combustión interna o, en algunos casos, como aditivo en la formulación de las

gasolinas. El estudio realizado tiene por objetivo evaluar la producción de energía a partir del bagazo de la caña, obtenida mediante procesos térmicos y bioquímicos, utilizando como indicador la razón de energía neta para ambas vías de obtención. El análisis del desempeño energético del proceso permite orientar las investigaciones acerca de las opciones más convenientes para el aprovechamiento energético de un residuo que, de otro modo, sería inutilizado, ocasionando problemas ambientales en las instalaciones de generación del residuo, debido a las dificultades para su almacenamiento, transporte y disposición final. El estudio se limita por la evaluación de la producción de energía vía fermentación, quedando excluidos otros procesos de aprovechamiento energético tales como la gasificación y la pirólisis, ya existentes en fases experimentales, los cuales pueden ser estudiados en etapas posteriores de investigación.

## Materiales y Métodos

El estudio del aprovechamiento energético del bagazo de la caña de azúcar se estructura en tres etapas. En primer lugar, se definen los esquemas tecnológicos de las vías de obtención de energía a partir del bagazo de la caña, sobre la base de procesos y técnicas ya estudiadas. En segundo lugar, se recopila la información técnica básica para estimar el potencial energético de los productos del procesamiento del bagazo, así como los consumos energéticos a lo largo de toda la cadena de proceso, para, finalmente, cuantificar el indicador de desempeño

energético elegido para la evaluación. Las etapas mencionadas se describen en detalle a continuación.

### **Definición de los esquemas tecnológicos**

Las tecnologías de obtención de energía comprenden el proceso convencional de producción de energía térmica mediante la combustión del residuo en una caldera de producción de vapor y la obtención de un combustible líquido, el etanol, a partir de la fermentación del material a través de procesos bioquímicos. La Figura 1 ilustra el esquema tecnológico seleccionado para el primer proceso considerado.

El presente estudio parte de la premisa del procesamiento de 1 t de bagazo de caña para la producción de energía. En el primer esquema considerado, el residuo, con una humedad de 50%, se somete a combustión en una caldera bagacera para la producción de calor, utilizado en la generación de vapor en la misma instalación.

El segundo proceso considerado, la producción de etanol carburante, se lleva a cabo a partir de la fermentación del material. El modelo utilizado como esquema de proceso seleccionado se ilustra en la Figura 2.

La producción de etanol parte del acondicionamiento del residuo mediante operaciones de fragmentación. A continuación, la obtención de los azúcares fermentables se logra mediante una primera etapa de hidrólisis ácida, la separación de los líquidos y sólidos para finalmente, someter el material a una segunda hidrólisis ácida, que permitirá la obtención de los azúcares fermentables. El material extraído se introduce en unidades

de fermentación donde, debido a reacciones bioquímicas controladas, se produce el alcohol hidratado, el cual será purificado mediante operaciones de separación de fases por destilación. El modelo seleccionado parte del supuesto del procesamiento de 1 t de bagazo para la producción de etanol. De acuerdo a los datos presentados por Diez y Garrido (2012), se pueden obtener 187 l de etanol carburante a partir de 1 t de bagazo procesado, con una densidad energética de 26,8 MJ/kg.

### **Obtención de datos bibliográficos**

El estudio de las opciones de aprovechamiento energético parte del procesamiento de datos secundarios obtenidos de la revisión de la literatura científica, de manera específica, para cada uno de los esquemas tecnológicos seleccionados. En el primer caso, la combustión directa del bagazo, tomando como referencia los datos publicados por Díez y Garrido (2012), de manera específica, la densidad energética del material de 9 MJ/kg y estimando la producción de residuo en 0,3 t / t caña procesada, se cuantifica la cantidad de energía producida a partir de 1 t de caña procesada.

La obtención de energía mediante la producción de etanol vía fermentación de la biomasa residual, toma igualmente como base de cálculo el procesamiento de 1 t de bagazo para obtener 187 l de etanol, cuyas propiedades se resumen en la Tabla 1.

La estimación del indicador energético requiere la cuantificación de los consumos energéticos en cada una de las etapas de la cadena de procesamiento. Dada

la ausencia de datos acerca de consumos energéticos en instalaciones de producción de etanol a partir de bagazo de caña, se realiza el estudio tomando como referencia los datos publicados en la base de datos de Ecoinvent (Reporte 17) del Centro Suizo para Inventarios del Ciclo de Vida (2007), considerando una instalación industrial para producción de etanol a partir de caña de azúcar ubicada en el contexto latinoamericano, con una capacidad de procesamiento que permite clasificarla como de mediana escala. Los consumos energéticos estimados se resumen en la Tabla 2.

### **Estimación del indicador energético**

El indicador energético seleccionado para evaluar el desempeño del proceso de obtención de energía a partir del bagazo de la caña es la “Razón de Energía Neta” (REN), la cual se define como el cociente entre la energía total producida, en el caso considerado, el alcohol combustible, a la energía total consumida a lo largo de la cadena de procesamiento de la materia prima para de transformación del material. En forma matemática se expresa mediante la relación siguiente:

$$REN = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía consumida}} \quad ... (1)$$

### **Resultados y Discusión**

A partir de los datos recopilados sobre el potencial energético de los productos obtenidos en ambos modelos de esquemas tecnológicos, se estima la energía obtenida por el procesamiento

del bagazo de la caña. Los resultados se recogen en la Tabla 3.

De acuerdo a los resultados obtenidos, a partir del procesamiento de 1 t de bagazo para producir 187 l de etanol vía fermentación alcohólica, se puede obtener técnicamente 3938 MJ de energía, valor superior a la energía estimada en 2700 MJ generados por la combustión de la biomasa residual para producir calor. Este resultado se atribuye a la elevada densidad energética del etanol, en comparación con el bagazo residual, lo cual representa un punto de apoyo para profundizar el estudio de la opción de aprovechamiento energético del bagazo mediante la fermentación para la obtención de alcohol carburante, constituyéndose en una vía de utilización de este residuo que, de otro modo, permanecería inutilizado, ocasionando problemas ambientales en las instalaciones de generación del mismo, debido a las dificultades para su almacenamiento, manejo y disposición final.

La obtención de energía mediante la fermentación del bagazo no sólo puede ser considerada beneficiosa por el potencial energético del etanol, sino que requiere la estimación de indicadores de desempeño energético para determinar el balance de la opción tecnológica considerada. El balance energético del modelo seguido para la obtención de etanol a partir del bagazo de la caña y la estimación del indicador utilizando la Ecuación 1, arrojó los resultados que se resumen en la Tabla 4.

El valor obtenido de REN permite

inferir que el proceso de producción de etanol a partir de la fermentación del bagazo, tiene un balance energético positivo, obteniéndose más del doble de la energía que se consume a lo largo de la cadena de producción. Sin embargo, además de la determinación de un balance energético positivo, se hace necesaria la determinación de indicadores ambientales para definir la sustentabilidad de las opciones tecnológicas, no sólo por consideraciones técnicas y energéticas,

sino también ambientales. Finalmente, cabe destacar que el aprovechamiento energético del bagazo, proveniente del procesamiento de la caña de azúcar, constituye una de las opciones de solución para los problemas ambientales asociados a la generación, manejo y la disposición final de este residuo industrial pero requiere, en forma adicional, la consideración de aspectos económicos y sociales, lo cual constituye la gestión del ciclo de vida de los procesos estudiados.



Figura 1. Esquema de la combustión del bagazo para producción de energía térmica

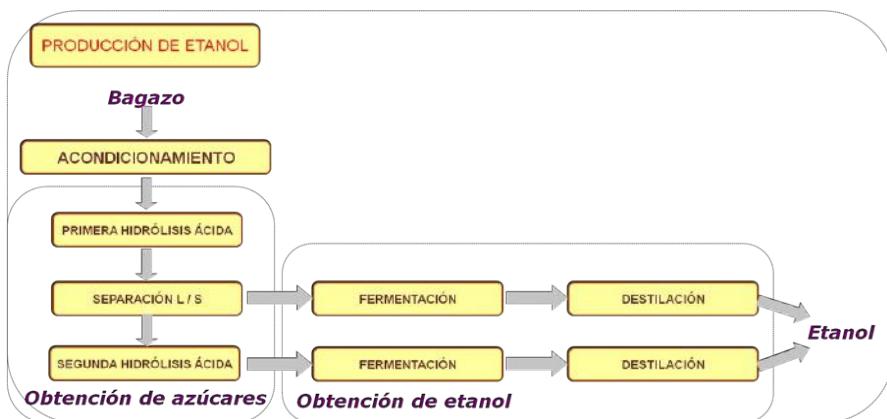


Figura 2. Esquema de la fermentación del bagazo para producción de etanol

Tabla 1. Propiedades físicas del etanol utilizadas en el estudio

Variable	Valor
Densidad (kg/l)	0,79
Densidad energética (MJ/kg)	26,80

Tabla 2. Energía consumida para la producción de etanol

Variable	Valor
Energía eléctrica (MJ)	107,4
Calor (MJ)	1594,0

Tabla 3. Energía obtenida a partir del bagazo de la caña

Variable	Valor
Energía calorífica (MJ)	2700,0
Energía del etanol (MJ)	3938,0

Tabla 4. Balance de energía y estimación de indicador REN de la producción de etanol

Variable	Valor
Energía producida (MJ)	3938,0
Energía consumida (MJ)	1701,4
REN	2,3

## Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos en la evaluación energética de las opciones de aprovechamiento del bagazo, residuo proveniente del procesamiento de la caña de azúcar, se establecen las siguientes conclusiones: El aprovechamiento energético del bagazo, constituye una de las opciones de solución para los problemas ambientales asociados a la generación, manejo y la disposición final de este residuo industrial.

La obtención de energía es mayor en el combustible líquido, debido a su elevada densidad energética, en comparación a la energía térmica obtenida.

Los diferentes procesos de obtención de energía, sea el calor por combustión o los combustibles líquidos por la fermentación del material residual, requieren, además de la determinación de un balance energético positivo, la determinación de indicadores ambientales para definir la sustentabilidad de las opciones tecnológicas.

## Agradecimiento

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Centro de Investigaciones del Estado para la Producción Experimental Agroindustrial (CIEPE)

y su División de Control de Aguas, Evaluación y Tratamiento de Residuos Agroindustriales (CAETRA). De igual modo, se agradece la colaboración recibida del Ing. Francisco Diez del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) por su valiosa aportación durante el desarrollo de esta investigación.

## Referencias Bibliográficas

- Avella, O. (2007). Etanol celulósico a partir de residuos agrícolas. Biofuels: a technological perspective. Energy & Environmental.
- Diez, F.; Garrido, N. (2012). Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?. Ingeniería Química. Editorial Alción.
- Fedeagro. (2012). Estadísticas Agropecuarias de Producción Agrícola.
- Saxena, R.C.; Adhikari, D.K.; Goyal, H.B. (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes: a review. Renewable & Sustainable Energy Reviews (13): 168-178.
- Sutter, J. (2007). Life cycle inventories of bioenergy. Ecoinvent Report N° 17.