

Cálculo del beneficio ambiental de la caña de azúcar para la producción de etanol combustible

Lourdes Zumalacárregui*[§], Osney Pérez*, Gerardo Lombardi**,
Pedro Rodríguez**, Beatriz Zumalacárregui *

* Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

** Laboratorio de Termodinámica y Fluidos, Universidad de São Paulo, Brasil

§ e-mail:lourdes@quimica.cujae.edu.cu

(Recibido: Enero 17 de 2008 - Aceptado: Mayo 30 de 2008)

Resumen

Este artículo presenta de manera detallada el cálculo del beneficio ambiental asociado al uso de la caña de azúcar para la producción de etanol combustible en una destilería de etanol diversificada que está concebida para operar como una agro-industria. Al considerar las diversas etapas del proceso de producción tales como la formación de biomasa, el transporte de la caña desde el campo hasta la fábrica, la producción de etanol, la combustión de bagazo, la digestión anaeróbica de las vinazas y la combustión del metano generado, y la combustión del etanol en los vehículos automotores, se demuestra que el uso de la caña es beneficioso para el medio ambiente porque involucra una sustracción de CO₂ del ambiente de 22,639 ton / año y una incorporación al ambiente de 15,244 ton / año de O₂, para una destilería con capacidad de producción de 40,000 L / día de etanol combustible. Además, se presenta el cálculo de la cantidad de CO₂ que se incorporaría al medio ambiente si en esa destilería se utilizara gas natural para la generación de electricidad mediante un ciclo de potencia combinado.

Palabras clave: Biocombustibles, Etanol combustible, Dióxido de carbono, Efecto de invernadero, Destilería diversificada.

CHEMICAL ENGINEERING

Calculation of the environmental benefit of sugar cane for the production of fuel ethanol

Abstract

This paper presents a detailed calculation of the environmental benefit associated to the use of sugar cane for the production of fuel ethanol in a diversified ethanol distillery that is devised to operate as an agroindustry. From the consideration of the several stages of the production process such as biomass production, transportation of cane from the field to the factory, ethanol production, bagasse combustion, anaerobic digestion of vinasses and combustion of generated methane, and combustion of ethanol in automotive vehicles, it is shown that the use of sugar cane is environmentally beneficial because it involves the removal of 22,639 ton / year of CO₂ from the atmosphere and the incorporation of 15,244 ton / year of O₂ into the atmosphere, for a distillery with a production capacity of 40,000 L / day of fuel ethanol. Also, a calculation is made for the amount of CO₂ that would be incorporated into the atmosphere if natural gas were used in the distillery for the generation of electricity by means of a combined power cycle.

Keywords: Biofuels, Fuel ethanol, Carbon dioxide, Greenhouse effect, Diversified distillery.

1. Introducción

El uso del etanol como combustible automotor ha ganado interés durante los últimos años debido a razones ecológicas y económicas. El etanol se ha producido tradicionalmente por fermentación de materias primas azucaradas y amiláceas. Sin embargo, esas materias primas también constituyen importantes fuentes de alimentos y su disponibilidad no es suficiente para cubrir la demanda potencial de etanol combustible (Pimentel, 2001). Además, cuando se usan sustratos azucarados y amiláceos, la materia prima representa una parte significativa del costo total de producción de etanol (García et al., 2000; Pimentel, 2001). Por tanto, la producción debería realizarse eficientemente y a partir de diversas materias primas como, por ejemplo, diferentes tipos de mieles y jugos desviados de la producción de azúcar. El bagazo y los residuos agrícolas de la caña de azúcar son materiales lignocelulósicos que por su alto contenido de glúcidos, su bajo costo y su disponibilidad pueden ser una opción para la producción de etanol (Martín, 2002). Los biocombustibles pueden contribuir al desarrollo sostenible y a la mitigación del cambio climático, pero han de tenerse en cuenta aspectos sociales, como la seguridad alimentaria y ambiental (Pich, 2007).

Dadas las excelentes cualidades físico-químicas y termodinámicas del etanol combustible y de las favorables propiedades ambientales del cultivo de la caña, el etanol obtenido a partir de ella, es un buen candidato para sustituir a derivados del petróleo. Este hecho justificó el estudio para la creación de una destilería de etanol diversificada (DED), integrada a la producción de alimentos de forma orgánica, permitiendo obtener objetivos económicos y sociales de excelencia, teniendo al hombre y la protección del medio ambiente como su centro (Ramos-Rodríguez et al., 2003).

En el presente trabajo se demuestra que la destilería de etanol diversificada contribuye de forma positiva a la preservación del medio ambiente por el efecto neto de sustracción de CO₂ y aporte de O₂ a la atmósfera.

2. Metodología

Con en el objetivo de simplificar los cálculos, se realizan algunas consideraciones que se presentan a continuación.

- El terreno se encuentra limpio de vegetación al inicio de la cosecha.
- La producción de la DED es de 40,000 L / día de etanol anhidro durante 8 meses. La densidad del etanol a temperatura ambiente es igual a 789.5 kg/m³, por lo que la producción de la destilería es de 31,580 kg de etanol por día.
- La productividad de la caña es de 67 a 70 L de etanol / ton de caña (Sánchez & Cardona, 2005).
- La composición aproximada de la caña en biomasa es la siguiente: 12.5 % de sacarosa, 2.5 % de xilosa, 7 % de celulosa y 2 % de lignina (Mesa-Orama & González-Penichet, 2003).
- Se obtienen entre 0.25 y 0.33 ton de bagazo / ton de caña procesada (Pinho de Assis, 2006; Cruz-González et al., 1996; Lamonica, 2007). Considerando el 50 % de humedad del bagazo se obtienen entre 0.13 y 0.17 ton de bagazo seco / ton de caña.
- El tiempo de vida de la caña, hasta su corte, es de un año (365 días). La combustión del bagazo y del etanol se realiza el día en que se recoge la caña.
- El bagazo seco tiene 50 % de celulosa, 30 % de hemicelulosas y 20 % de lignina. En cuanto a su composición elemental aproximada es posible considerar valores de 48.3 % de C, 6 % de H, 43.3 % de O, 2.4 % de cenizas (Mesa-Orama & González-Penichet, 2003).
- La raíz de la caña representa el 11% de la masa de la caña cortada y tiene su misma composición (Ramos-Rodríguez & Lombardi, 2001).

Los cálculos han sido realizados considerando que el crecimiento de la caña se consolida en 1 año, con un aumento lineal de la masa en función del tiempo hasta el día de corte. De esta forma,

durante los 365 días del año la caña estará retirando CO₂ del ambiente, fijando el carbono para su crecimiento y retornando O₂ al medio.

Toda la caña sembrada se recoge y procesa y el bagazo se quema en las calderas, durante todos los días de los 8 meses del período productivo de la destilería. Todo el oxígeno liberado hacia la atmósfera por la caña, como producto de la fotosíntesis, es consumido en el período que va desde el inicio de la quema del bagazo en la caldera hasta el último día de la producción del etanol. La paja se deja en el suelo como protección contra la germinación de hierbas dañinas, por lo que no se quema.

3. Cálculo del beneficio ambiental

En la Figura 1 se presenta un esquema simplificado de las diferentes etapas que intervienen en el proceso de transformación de la caña hasta obtener la energía liberada por la combustión del etanol en los vehículos.

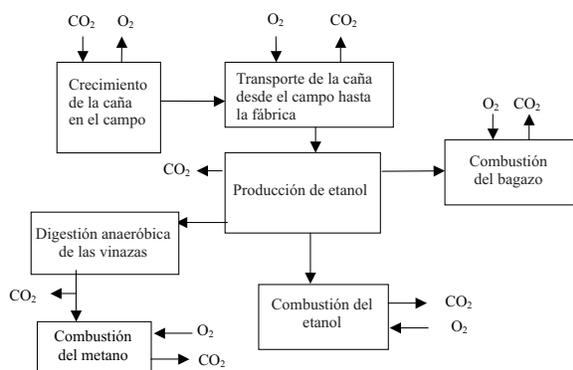


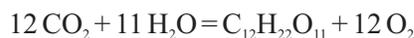
Figura 1. Etapas del proceso de transformación de la caña involucradas en el cálculo del beneficio ambiental.

3.1 Crecimiento de la caña para formación de la biomasa

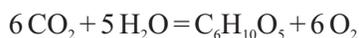
La producción de etanol, de 40,000 L / día, ocurre durante cada uno de los 244 días del corte de caña. Considerando que se producen 67 L de alcohol por tonelada de caña, entonces deben estar disponibles para el corte y procesamiento 597 ton de caña / día.

Para la formación de esta masa de caña, con una composición de 12.5 % sacarosa, 2.5 % xilosa, 7 % celulosa y 2 % lignina, se requiere consumir CO₂ del medio y devolver O₂ a éste, en cantidades dictadas por las siguientes ecuaciones estequiométricas:

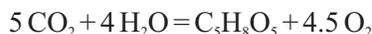
Para la sacarosa,



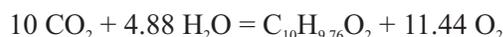
Para la celulosa,



Para la xilosa,



Para la lignina,



Las cantidades retiradas de CO₂ y las cantidades aportadas de O₂, para 597 ton de caña / día, se muestran en la Tabla 1.

Como se aprecia, el proceso de formación de la biomasa consume 238.0 ton de CO₂ / día y entrega 174.8 ton de O₂ / día.

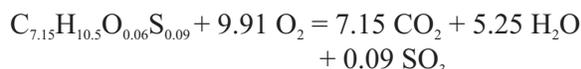
Tabla 1. Cantidades retiradas de CO₂ y cantidades aportadas de O₂ para la formación de biomasa a partir de 597 ton de caña / día.

Componente	Relación estequiométrica CO ₂ / componente	Relación estequiométrica O ₂ / componente	CO ₂ retirado (ton / día)	O ₂ aportado (ton / día)
Sacarosa	528 / 342	384 / 342	115.2	83.8
Celulosa	264 / 162	192 / 162	68.1	49.5
Xilosa	220 / 148	144 / 148	22.2	14.5
Lignina	440 / 161.8	366.1 / 161.8	32.5	27.0
Total			238.0	174.8

Adicionalmente, dado que las raíces constituyen el 11 % de la masa de caña y que éstas también se desarrollan durante el crecimiento, los valores anteriores aumentan 11 %, resultando un consumo de 264.2 ton de CO₂ / día y un aporte de 194.0 ton de O₂ / día.

3.2 Transporte de la caña desde el campo hasta la fábrica

Mesa-Orama & González-Penichet (2003) estimaron que el consumo promedio de combustible para el transporte de la caña desde el campo hasta la fábrica es de 6 kg de petróleo equivalente / ton de caña. Si la composición del petróleo equivalente es 85.7 % de C, 10.5 % de H, 0.92 % de O, 2.8 % de S (en peso), se obtiene como fórmula empírica de éste la siguiente: C_{7.15}H_{10.5}O_{0.06}S_{0.09}. Entonces, se puede escribir la siguiente ecuación para la reacción de combustión:



A partir de la estequiometría de la ecuación anterior, hay un aporte de CO₂ al medio de 3.15 kg de CO₂/kg de petróleo y un consumo de O₂ de 3.17 kg de O₂ / kg de petróleo. Dado que se transportan 597 ton de caña / día, el aporte de CO₂ es de 11.28 ton / día y el consumo de O₂ es de 11.35 ton / día.

3.3 Producción de etanol

El etanol se produce a partir de la fermentación de los azúcares de acuerdo con la siguiente reacción:



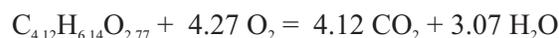
Por consiguiente, se obtienen 0.956 kg de CO₂ por kg de etanol producido. Si se producen 31.58 ton de etanol / día, entonces se obtendrán 30.21 ton de CO₂ / día.

3.4 Combustión del bagazo

Como el porcentaje de bagazo seco en la caña se considera que es de 17 %, entonces la cantidad de bagazo seco que se quema es de 101.5 ton / día.

Con la composición elemental del bagazo seco dada en la Sección 2 (Mesa-Orama & González-Penichet, 2003), se obtiene la siguiente fórmula empírica: C_{4.12}H_{6.14}O_{2.77}.

La combustión del bagazo, ocurre de acuerdo con la siguiente reacción:



Con base en la ecuación anterior, se consumen 1.368 kg de O₂ / kg de bagazo y se producen 1.815 kg de CO₂ / kg de bagazo. Entonces, se consumen 138.8 ton / día de O₂ del medio y se aportan a éste 184.2 ton / día de CO₂.

3.5 Digestión anaeróbica de las vinazas

Como parte del proceso de producción de etanol, se generan las vinazas, que son las aguas residuales procedentes de las columnas de destilación. En la destilería DED, las vinazas se utilizan para la producción de biogas en un digestor anaeróbico. Como una destilería de etanol típica produce 0.013 m³ de vinazas / L de etanol (Rocha, 2007), entonces para la destilería estudiada se producen 520 m³ / día de vinazas. La degradación anaeróbica de los efluentes es una tecnología eficiente para reducir la carga de las vinazas. Algunos estudios demuestran que cuando se trabaja con vinazas provenientes de la producción de etanol a partir de materiales de baja demanda química de O₂ (DQO), en el rango de 15 a 30 kg / m³, como son los jugos de caña, se obtienen de 13 a 16 m³ de biogas / m³ de vinaza (Valdés, 2006). Si se considera el valor más alto de 16, entonces se producen 8,320 m³ de biogas / día.

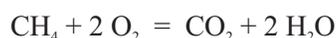
La composición aproximada del biogas obtenido con tecnologías convencionales puede tomarse como 50% CH₄ y 50% CO₂. De esta forma, se producen por esta vía 4,160 m³ de CH₄ / día y 4,160 m³ de CO₂ / día que corresponden a 2.97 ton de CH₄ / día y 8.17 ton de CO₂ / día.

3.6 Combustión del metano en el biogas

El CH₄ contenido en el biogas se quema de acuerdo con la siguiente reacción:

Tabla 2. Balance neto de aportaciones de CO₂ y O₂ (valores negativos de aportaciones representan sustracciones).

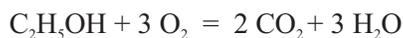
Etapa del proceso	ton / día de CO ₂ aportadas	días / año	ton / año de CO ₂ aportadas	ton / día de O ₂ aportadas	días / año	ton / año de O ₂ aportadas
Formación de biomasa	-264.20	365	-96,433	194.00	365	70,810
Transporte de caña	11.28	244	2,752	-11.35	244	-2,769
Producción de etanol	30.21	244	7,371			
Combustión del bagazo	184.20	244	44,945	-138.80	244	-33,867
Digestión de vinazas	8.17	244	1,994			
Combustión del metano	8.17	244	1,994	-11.88	244	-2,899
Combustión del etanol	60.40	244	14,738	-65.90	244	-16,080
Total			-22,639			15,244



Por tanto, la combustión de todo el metano generado en la digestión anaeróbica de las vinazas aporta 8.17 ton de CO₂ / día y consume del medio 11.88 ton de O₂ / día.

3.7 Combustión del etanol en los vehículos

El etanol producido en la destilería se quema en los vehículos automotores, de acuerdo con la siguiente reacción:



Con base en la ecuación anterior, se consumen 2.087 kg de O₂ / kg de etanol y se producen 1.913 kg de CO₂ / kg de etanol.

La quema del etanol usado como combustible motor consume entonces 65.9 ton / día de O₂ y produce 60.4 ton / día de CO₂. Realmente, la combustión del etanol utilizado como combustible motor ocurre en las calles con posterioridad a la combustión del bagazo, lo que le confiere un carácter conservador al cálculo ya que aquí se considera que la combustión de ambos ocurre el mismo día del corte.

3.8 Balance neto

De los resultados mostrados en la Tabla 2, se concluye que la destilería de etanol diversificada

retira 22,639 ton / año de CO₂ y aporta 15,244 ton / año de O₂. Por consiguiente, el balance neto de la producción de etanol por esta tecnología resulta beneficioso para el medio ambiente en términos de CO₂ y O₂ pues retira mayor cantidad de CO₂ de la que incorpora y a la vez restituye O₂.

Según Ramos-Rodríguez & Lombardi (2001), una destilería de etanol diversificada de 40,000 L / día de etanol, en términos energéticos, suministra 5.2 MW de electricidad excedente. Es posible entonces calcular la aportación de CO₂ que originaría la producción de esta electricidad utilizando gas natural (CH₄). Para ello, se consideró que la energía eléctrica se produce con base en el ciclo combinado, que es el ciclo más eficiente desarrollado en plantas termoeléctricas, y el cual utiliza simultáneamente turbinas de gas y de vapor de agua, con un rendimiento térmico superior al 50%.

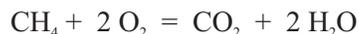
Para un valor calórico inferior (VCI) de 52.9 MJ / kg y considerando un valor de 50 % para el rendimiento térmico del ciclo (η), el consumo de gas natural (m_{comb}) para la producción de una potencia eléctrica (W_{elect}) de 5.2 MW se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{W_{elect}}{m_{comb}(VCI)} = \frac{5.2 \text{ MJ/s}}{m_{comb}(52.9 \text{ MJ/kg})} = 0.5 \quad (1)$$

De la Ec.(1), resulta que

$$m_{\text{comb}} = 0.2 \text{ kg/s} = 17.0 \text{ ton de gas natural / día}$$

La combustión del gas natural ocurre de acuerdo con la siguiente reacción:



Si se considera el mismo número de días de producción (244), se necesitan 4,148 ton / año de gas natural con capacidad de producir estequiométricamente 11,407 ton de CO_2 / año, que corresponde a la masa anual de CO_2 que se incorpora al medio al generar 5.2 MW de electricidad durante un año a partir de gas natural.

4. Comentarios y conclusiones

La caña resulta ser una materia prima adecuada para producir etanol para vehículos automotores y para generar energía eléctrica al no ser fósil y ser renovable y ecológica.

La producción de etanol en una destilería de alcohol diversificada evita la emisión acumulativa de gases como el CO_2 que es el máximo responsable del efecto de invernadero, al hacer un retiro neto de 22,639 ton de CO_2 / año.

La producción de etanol en una destilería de alcohol diversificada oxigena la atmósfera al hacer un aporte neto de 15,244 ton de O_2 / año.

La introducción de la destilería de etanol diversificada posibilita la reducción del contenido de CO_2 que de otro modo se incorporaría al medio si se generara, mediante gas natural, la electricidad que entrega la destilería.

5. Referencias bibliográficas

Cruz-González, V., Sulroca-Domínguez, F., Chirino-Madruga, L., & Gómez-Jiménez, W. (1996). Generación de electricidad a partir de los residuos de la caña de azúcar. *Cuba: Investigación Económica* (1), 1-10.
www.uh.cu/centros/ceec/Sitio800/paginas/Publicaciones/Biblioteca/por%20autores/R05%20Victor.pdf

García, J.L., Suárez, M., Domenech, F., Blanco, G. & Santiesteban, C. (2000). Alcohol. En: L.O. Gálvez (editor), *Manual de los derivados de la caña de azúcar*, p. 197-206. Tercera Edición, La Habana: Imprenta del Ministerio del Azúcar.

Lamonica, H. M. (2007). *Produção de vapor e eletricidade- aevolução do setor sucroalcooleiro*. II Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindustria Sucroalcooleira, FZEA, Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brasil.
www.nest.unifei.edu.br/inglesnew/news/GERA/Dia%2012/4-Helcio-Lamonica.pdf

Martín, C. (2002). *Estudio de la inhibición de la fermentación de hidrolizados de bagazo de caña de azúcar para la producción de etanol*. Tesis Doctoral, Facultad de Mecánica y Química, Universidad de Matanzas, Cuba.

Mesa-Orama, J. & González-Penichet, L. (2003). *Balance de CO_2 en la obtención de energía renovable a partir de caña de azúcar*.
<http://www.ilustrados.com/documentos/balancedo2.doc>

Pich-Madruga, R. (2007). *Alerta Cuba sobre necesidad de balance en producción de biocombustibles*. Intervención en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD), Río de Janeiro, diciembre 2-4 de 2007. *Diario Granma* (Cuba), Año 11, No. 337, 6 de diciembre de 2007.
www.granma.cubaweb.cu/2007/12/06/interna/artic10.html

Pimentel, D. (2001). Ethanol fuels: energy, economics and environmental impact. *International Sugar Journal* 103 (1235), 491-494.

Pinho de Assis, P. (2006). *La producción integrada de azúcar y alcohol*. IX Congreso Internacional de Azúcar y Derivados, DIVER 2006, Cuba.

Ramos-Rodríguez, P. A., & Lombardi, G. (2001). *Viabilidade econômica do projeto conceitual para execução do projeto dimensional da MUAI*. Relatório de Pesquisa FAPESP, NETeF, Escola Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

Ramos-Rodríguez, P.A., Lombardi, G., Corsini, R. & Pérez-Ones, O. (2003). Destilería diversificada de alcohol. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia* (28), 37-49.

Rocha, M.H. (2007) *Avaliação da eco-eficiência ambiental da vinhaça para diferentes formas de disposição aplicando ACV*. II Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindustria Sucroalcooleira, FZEA, Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brasil.

www.nest.unifei.edu.br/inglesnew/news/GERA/Dia%2012/6-Mateus-Henrique-Rocha.pdf

Sánchez, O.J., & Cardona, C.A. (2005). Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia* 30 (11), 671-678.

Valdés, A (2006). *Empleo de la biomasa azucarera como fuente de alimento, energía, derivados y su relación con la preservación del medio ambiente*. Seminario sobre Tecnologías para el Uso Eficiente de Combustibles y Energías a Partir de la Biomasa Azucarera y otras Biomosas incluyendo el Uso Económico de sus Residuos y Residuales. Red Temática IVH, BAZDREAM, CYTED, Argentina.