

POTENCIALIDADES DE GENERACIÓN DE ELETRICIDAD A PARTIR DE BIOMASA

Possibilities for electric generation from biomass

RESUMEN

La instalación de una destilería de etanol para la Generación de Energía Renovable Integrada a la Producción de Alimentos (GERIPA) presenta muchas ventajas en comparación con las destilerías tradicionales. La biomasa constituye una de las principales fuentes de generación de energía limpia y barata, pasando de ser un subproducto a ser una salida fundamental del proceso productivo. En el trabajo se calcula la energía disponible en el bagazo y paja de caña y de sorgo, así como en el biogás obtenido, para producir vapor destinado a los procesos y a la producción de electricidad, utilizando un generador de vapor tradicional con eficiencia de 88%, y un turbogenerador de condensación y extracción con rendimiento de 70%. En particular, para el caso de una planta de este tipo productora de 125 000 L/día de etanol, la generación de electricidad a partir de la biomasa que esta industria produce, alcanza el valor 6,0 MW de potencia eléctrica a entregar al Sistema Energético Nacional. Constituye una fuente de desarrollo económico, social y estratégico, atendiendo al concepto de auto sostenibilidad dado en el Protocolo de Kyoto.

PALABRAS CLAVES: biomasa, cogeneración, etanol

ABSTRACT

An ethanol distillery, included in the project for the Generation of Renewable Energy Integrated to Production of Foods (GERIPA), shows outstanding advantages in comparison with the traditional distilleries. The biomass constitutes one of the main sources for generation of clean and cheap energy, leaving the category of sub-product, and being a fundamental material for the productive process. In this paper the available energy from sugar cane and sorghum, bagasse and straw, as well as biogas, is used to produce vapor for the process and electricity, using a traditional boiler (efficiency 88%) and a condensation and extraction turbine (efficiency 70%). For a production plant of Renewable Energy Integrated to the Production of Foods of 125 000 L ethanol/day, the generation of electricity using the biomass produced by this industry, reaches 6.0 MW of power surplus to the National Electro-energetic System. It constitutes a pole for economic, social and strategic development, assisting to the concept of self sustentation given by Kyoto's Protocol.

KEYWORDS: biomass, cogeneration, ethanol

1. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica a partir de bagazo y paja de la caña de azúcar y de otros residuos agrícolas fue defendida en diciembre del 2007 en audiencia pública realizada por la Subcomisión Permanente de Biocombustibles en Brasil. Aún hoy, el uso de calderas de baja presión en la industria azucarera y alcoholera hace que apenas se genere la electricidad necesaria para el consumo propio. Con el uso de calderas de alta presión, secadores de bagazo y turbocompresores de condensación y extracción resulta posible convertir bagazo y paja en electricidad de forma ventajosa.

La introducción del proyecto Generación de Energía Renovable Integrada a la Producción de Alimentos [1]

permite alcanzar ventajas económicas, sociales y ambientales si se compara con otras energías renovables. Entre las ventajas están:

- se produce simultáneamente electricidad, etanol y alimentos orgánicos variados;
- dado su tamaño la instalación puede ser construida en parcelas propias, en que se produzca la materia prima, caña de azúcar y sorgo dulce, reduce los gastos de transporte, se logra un ciclo productivo de 355 días al año, vincula al hombre al lugar de trabajo, puede constituirse en agroindustria, usando fertilizantes orgánicos y reciclados lo que aumenta la competitividad de los productos.
- el tiempo de retorno de la inversión es 20% menor que el de una destilería tradicional que produzca 500 000L/d. Así GERIPA es una forma productiva innovadora con

PEDRO A. RODRIGUEZ

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor Titular
Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” Cuba
pedro@economia.cujae.edu.cu

GERALDO LOMBARDI

Ingeniero Aeronáutico, Ph.D.
Profesor Titular
EESC-Universidad Sao Paulo Brasil
lombardi@sc.usp.br

ALDO OMETTO

Ingeniero Producción, Ph.D.
Profesor Asistente
EESC-Universidad Sao Paulo Brasil

LOURDES M.

ZUMALACARREGUI
Ingeniero Químico, Ph.D.
Profesor Titular
Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” Cuba
lourdes@quimica.cujae.edu.cu

OSNEY PEREZ

Ingeniero Químico, M.Sc.
Profesor Asistente
Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” Cuba
osney@quimica.cujae.edu.cu

condiciones para modificar los procedimientos de la agroindustria evitando, por ejemplo, el desbroce de la Amazonía para encontrar nuevas fuentes agropecuarias.

- La energía proveniente de la caña o el sorgo es competitiva en términos económicos en comparación con los actuales precios del petróleo.

Las excelentes cualidades físico-químicas y termodinámicas del etanol justifican que en el mundo se estudien procesos de producción de energía a partir de éste, que sean económicamente viables. No obstante, esto se debe realizar sin afectar la disponibilidad de alimentos para la población. La implantación de sistemas integrados como GERIPA permitiría satisfacer los objetivos económicos y sociales de excelencia teniendo al hombre y la protección del medioambiente como centro.

2. PROCEDIMIENTO

Para demostrar las posibilidades de generación de energía de GERIPA se utilizan ecuaciones de balance de masa y energía [2,3], con las siguientes consideraciones:

- La producción de etanol de la GERIPA es 125 000 L/d.
- La electricidad se genera durante 355 días del año. Las fuentes de producción de energía son: el bagazo producido a partir de caña durante 235 días de zafra y de sorgo durante 120 días; el 50% de la paja proveniente de ambos cultivos; el biogás producido en un biodigestor, al que alimentan la torta proveniente del filtro en el proceso de fabricación de azúcar, parte del fondo de las cubas de fermentación en la destilería, las excretas del ganado, las vinazas y las cenizas de la caldera.
- El rendimiento de etanol por tonelada es 75 L/t cuando se trabaja con caña y 60 L/t cuando se trabaja con sorgo.
- El bagazo y la paja se queman en suspensión y a presión en el horno. El % de ceniza en el bagazo seco y en la paja es 2,5%.
- La eficiencia térmica del generador de vapor es 88%. [4]
- La humedad del bagazo y del sorgo es 50% y la de la paja 10%.
- El porcentaje de fibra en el bagazo de caña seco es 13% mientras que en el bagazo de sorgo seco es 12%. Por su parte, el porcentaje de paja que se obtiene por tonelada de bagazo seco es 14% y el cogollo representa el 2% de la paja.
- El valor calórico inferior de la fibra es 17 790 kJ/kg [5] y del biogás 21 340 kJ/m³.
- El generador de vapor produce vapor sobrecalentado a 10 MPa y 520 °C a partir de agua a 30 °C. Éste es enviado a un turbogenerador de alta potencia de 70% de rendimiento [6] del que se realiza una extracción a 0,15 MPa y 126 °C de 370 kg/t de caña y la descarga final se realiza a 0,0096MPa.
- La variación isentrópica de entalpía hasta las condiciones de la extracción es 881,15 kJ/kg, mientras que la variación isentrópica de entalpía hasta las condiciones de la condensación es 1331,57 kJ/kg.

- Se producen 1 500 m³/d de vinaza de DQO 22 500 mg/L. La remoción de DQO es del 70%.
- El índice de generación de biogás es 0,45 m³ biogás/kg DQO removido. [7]

El procedimiento de cálculo se relaciona continuación:

- Masa de caña, M (kg/d):

$$M = \frac{P}{R} * 1000 \quad (1)$$

Donde, P: Producción, (L/d); R: Rendimiento en etanol, (L/t).

- Masa de fibra, MF (kg/d):

$$MF = (1 - \% ceniza / 100) M * 0,01 F \quad (2)$$

Donde, F: Porcentaje de fibra por tonelada, (%) y % ceniza es el % de ceniza en bagazo seco).

- Masa de fibra húmeda, MF(H) (kg/d):

$$MF(H) = \frac{MF}{1 - 0,01H} \quad (3)$$

Donde, H: Humedad, (%).

- Valor calórico inferior del bagazo húmedo VCIbh, kJ/kg

Se conoce que el VCI de la fibra VCIf es 17 790 kJ/kg.

$$VCIbh = (1 - 0,01H) VCIf - 0,01H * hlv \quad (4)$$

Donde, hlv es el calor latente de vaporización a 25°C= 2441,2 kJ/kg

- Masa de vapor sobrecalentado Mvsc, kg/d

Para una caldera que a partir de agua a 30°C, produzca vapor sobrecalentado a 10MPa y 520°C y con una eficiencia térmica $\epsilon_{\text{tg}} = 0,88$, la masa de vapor producido es:

$$M_{vsc} = \frac{VCIbh * MF(H) * \epsilon_{\text{tg}}}{\Delta h_{\text{gv}}} \quad (5)$$

Donde, Δh_{gv} =variación de entalpía del agua en el generador de vapor =3 300,2 kJ/kg

- Demanda de vapor por el proceso, Dvp, kg/d

En una destilería convencional totalmente equipada con motores eléctricos el consumo medio de vapor de proceso es de 370 kg vapor / t de caña procesada. [4] Por tanto, el consumo total se evalúa como:

$$D_{vp} = M * 370 \quad (6)$$

- Vapor en exceso, EV, kg/d

Si se conoce la producción de vapor posible (Mvsc) y la demanda de vapor del proceso (Dvp) el exceso de vapor de que se dispone es:

$$EV = M_{vsc} - D_{vp} \quad (7)$$

Donde, EV: exceso de vapor disponible, kg/d

- Potencia eléctrica a producir a partir de bagazo, PEbh, MW

Dado que en el turbogenerador el vapor entra a T = 520°C, y P= 10MPa, la entalpía del vapor es $h_{\text{ETG}} = 3425,1$ kJ/kg.

Considerando la expansión isentrópica, la entalpía del vapor a la presión de la extracción, 0,15 MPa, es 2460 kJ/kg, mientras que a las condiciones de la descarga, 0,0096 MPa, el valor es de 2094,2 kJ/kg

$$\Delta h_1 = 3425,1 - 2460,0 = 965,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_2 = 3425,1 - 2094,2 = 1330,9 \text{ kJ/kg}$$

De aquí la potencia eléctrica generada a partir del bagazo húmedo puede evaluarse como:

$$PEbh = (\Delta h_1 * Dvp + \Delta h_2 * EV) \eta_{TG} * 8,64 * 10^{-7} \quad (8)$$

Donde, $\eta_{TG} = 70\%$

Si se aprovecha el 50% de la paja para producir vapor y generar electricidad, la secuencia de cálculos es:

-Paja, MP (kg/d):

$$MP = 0,01RP * M * 0,01F \quad (9)$$

Donde, RP: % de paja por masa de bagazo seco

-Paja a quemar, MPq, kg/d

Conociendo que el cogollo representa el 2% de la paja y que en el campo permanece el 50% de ésta, la cantidad de paja que se puede quemar es:

$$MPq = 0,5(MP - 0,02MP) \quad (10)$$

-Fibra en paja, FP, kg/d

$$FP = MPq(1 - 0,025) \quad (11)$$

-Valor calórico inferior de la paja, VCIp, kJ/kg

$$VCIp = (1 - Hp) VCI_f - Hp * hlv \quad (12)$$

Donde, Hp es la humedad de la paja, %

Masa de paja húmeda, MP(H), kg/h

$$MP(H) = \frac{FP}{1 - 0,01Hp} \quad (13)$$

-Vapor producido a partir de paja, VP, kg/d

$$VP = \frac{VCIp * MP(H) * \epsilon_{igv}}{\Delta h_{gv}} \quad (14)$$

-Potencia eléctrica a partir de paja, PEp, MW

$$PEp = \Delta h_2 * VP * \eta_{TG} * 8,64 * 10^{-7} \quad (15)$$

Cuando la zafra de caña termina, y se empieza a trabajar con sorgo, el procedimiento descrito entre las ecuaciones 1 y 15 se repite, modificando los indicadores propios de este cultivo como son: rendimiento en etanol por tonelada (60 L/t) y el porcentaje de fibra en el sorgo (12%).

Adicionalmente es posible producir electricidad utilizando el biogás producido en el sistema. En este caso la secuencia de cálculos es:

- Volumen de biogás producido, Qb, m³/d

$$Qb = RB * Rem / 100 * Qv \quad (16)$$

Donde, RB: rendimiento de biogás por DQO removida;

Rem: % remoción de DQO; Qv: volumen de vinaza, m³/d

- Vapor producido a partir de biogás, Vb

$$Vb = \frac{VCIbg * Qb * \epsilon_{igv}}{\Delta h_{gv}} \quad (17)$$

Donde, VCIbg es el valor calórico inferior del biogás igual a 21 340 kJ/kg [7]

- Potencia eléctrica producida a partir de biogás, PEbg, MW.

$$PEbg = \Delta h_2 * Vb * \eta_{TG} * 8,64 * 10^{-7} \quad (18)$$

3. RESULTADOS

Aplicando el procedimiento de cálculo descrito para caña y sorgo se obtienen los resultados que se presentan en las Tablas 1 y 2.

Para caña de azúcar

	Unidad	Bagazo de Caña	Paja de caña
Masa de caña o paja a utilizar	kg/d	1 666 667	14 879
Masa de fibra	kg/d	211 250	14 506
VCI del combustible	kJ/kg	7 674	17 546
Masa húmeda	kg/d	422 500	16 118
Flujo de vapor producido	kg/d	864 597	75 407
Demanda de vapor a proceso	kg/d	616 667	-
Vapor para generar electricidad	kg/h	247 930	75 407
Variación isoentrópica hasta extracción	kJ/kg	881,15	881,15
Variación isoentrópica hasta condensación	kJ/kg	1 331,57	1331,57
Potencia eléctrica	MW	7,08	0,81

Tabla 1: Resultados obtenidos a partir de caña para una producción de etanol de 125 000 L/d

Para sorgo

	Unidad	Bagazo de sorgo	Paja de sorgo
Masa de caña	kg/d	2 083 333	35 000
Masa de fibra	kg/d	243 750	16 738
VCI del combustible	kJ/kg	7 674	17 546
Masa húmeda	kg/d	487 500	185 98
Flujo de vapor producido	kg/d	997 551	87 008
Demanda de vapor a proceso	kg/d	616 667	-
Vapor para generar electricidad	kg/h	380 884	87 008
Variación isoentrópica hasta extracción	kJ/kg	881,15	881,15
Variación isoentrópica hasta condensación	kJ/kg	1331,57	1331,57
Potencia eléctrica	MW	8,51	0,94

Tabla 2: Resultados obtenidos a partir de sorgo para una producción de etanol de 125 000 L/d

Por otra parte, la vinaza, residuo de la destilación del etanol producido por fermentación, es el principal subproducto de la agroindustria cañera, es un afluente altamente contaminante y se produce en grandes volúmenes, lo que dificulta su transportación y eliminación. De la biodigestión de las vinazas es posible obtener biogás, el que se puede utilizar en diferentes tecnologías y ciclos termodinámicos para convertir el biogás en electricidad. Entre estas tecnologías se encuentran la microturbina de gas y la quema conjunta de la vinaza con el bagazo en las calderas.

Los resultados de la generación de potencia eléctrica a partir del biogás, válidos para ambos cultivos, se muestran en la Tabla 3.

	Unidad	Biogás
Vinaza producida	m ³ /d	1500
Biogás producido	m ³ /d	10 631
Producción de vapor	kg/d	60 492
Potencia eléctrica	MW	0,65

Tabla 3. Resultados de la generación de energía eléctrica a partir de biogás

Por otra parte se requiere conocer la potencia eléctrica equivalente que demanda GERIPA para su funcionamiento. En la Tabla 4 se presentan estos consumos [1].

	Unidad	Caña	Sorgo
Limpieza en seco	MW	0,211	0,211
Irrigación	MW	0,259	0,259
Consumo de energía en la propia industria	kWh/t	35	35
Potencia consumida en la propia industria	MW	2,43	3,04
Potencia eléctrica total consumida	MW	2,89	3,51

Tabla 4. Consumo de potencia eléctrica de GERIPA

En la Tabla 5 se resumen los resultados del balance energético en la GERIPA.

	Unidad	Caña	Sorgo
Bagazo	MW	7,07	8,51
Paja	MW	0,81	0,94
Biogás	MW	0,65	0,65
Total	MW	8,53	10,10
Consumo	MW	2,89	3,51
Disponibilidad	MW	5,64	6,59

Tabla 5. Balance energético en la GERIPA

Ya que los cultivos se usan por períodos de tiempo diferentes, se puede evaluar el trabajo eléctrico disponible y con ello una potencia eléctrica media disponible como se muestra en la Tabla 6:

	Unidad	Caña	Sorgo
Tiempo	día	235	120
Energía eléctrica disponible	MWh	31 881	18 987
Total de energía eléctrica disponible	MWh	50 868	
Potencia eléctrica promedio	MW	6,0	

Tabla 6 Energía eléctrica producida y potencia eléctrica media en la GERIPA

Del resultado se aprecia que existe una disponibilidad de 6,0 MW que pueden ser entregados a la red electroenergética o utilizarse en otras necesidades locales. Esa energía es capaz de abastecer una ciudad de aproximadamente 18 mil habitantes. [8] Este valor pudiera incrementarse en un 14% si el bagazo se seca en un secador de lecho fluidizado que opere con la energía de los gases de combustión del generador de vapor, disminuyendo la temperatura de éste desde 247°C hasta 110°C y reduciendo el contenido de humedad hasta el 15%. [9]

Al evaluar el rendimiento térmico efectivo, a partir de la relación entre la energía eléctrica generada y la energía térmica de los combustibles utilizados, se obtiene un 20,0%. Si se calcula la cantidad de petróleo equivalente requerida para producir la misma potencia eléctrica neta mediante un ciclo de vapor de igual rendimiento efectivo, se obtendría una cantidad anual de petróleo equivalente de $3,2 \cdot 10^4$ t/año que podrían ser sustituidas por cada GERIPA que se instale.

4. CONCLUSIONES

- Los cálculos muestran que GERIPA-125000 L/d tiene un alto potencial de sostenibilidad energética, clasificándose como autoprodutora de energía eléctrica.
- La biomasa que genera es capaz de producir un excedente de 6,0 MW de potencia eléctrica equivalentes a 6,0 MW-h de energía eléctrica, disponible para ser suministrada al Sistema Energético Nacional, integrándose a éste.
- Cada GERIPA-125000 L/d que se instale sustituye el uso de $3,2 \cdot 10^4$ t/año de petróleo equivalente.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Lombardi, P.A.R. Ramos y R. Corsini “Potencial económico, social y ambiental de la producción integrada de alcohol, electricidad y alimentos” *Rev. Carbono-Ciencia e Mercado Global - Ecoplan*, Curitiba, Brasil. pp. 179 - 193, 2004.
- [2] M. Moran, H. Shapiro: “*Principios de Termodinámica para Ingeniería*”. Ed. LTC. 4ta Edición, 681p, 2002
- [3] P.A.R Ramos, L. Zumalacárregui, G. Lombardi, y O. Pérez. Generación eléctrica a partir de biomasa en una destilería diversificada, *Revista ICIDCA*, Vol. XLI, No. 2, pp. 39-43, 2007.
- [4] J. Barata y L. Cherubim. Caldema Eq. Ind. Ltda – Sertãozinho,SP,Brasil, engenharia@caldema.com.br. Información personal, 2009.
- [5] P. Chenú.- “Boilers” Lectures notes - Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Alcool do Est. São Paulo-Copersucar, Piracicaba-S.P.-Brazil, 1980
- [6] M Gonçalves. Siemens do Brasil–Turbogenerators – Sao Paulo, Brasil, mara.goncalves@siemens.com. Información personal, 2009.
- [7] A. Valdés, 2008 “Tecnologías para el uso eficiente de combustibles y energías a partir de la biomasa azucarera y otras biomásas incluyendo el uso económico de sus residuos y residuales” *Red temática CYTED: Empleo de la biomasa azucarera como fuente de alimento, energía, derivados y su relación con la preservación del medio ambiente (BAZDREAM)*, Argentina, 2008
- [8] A. Ometto, P Rodriguez, G Lombardi. “GERIPA a new concept for renewable energy and food production with environmental and social concerns” *Proceedings of IV Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”*. Unicamp, Campinas, SP, Brasil. June 16-19, 2004. 323-328
- [9] P. Rodríguez, G. Lombardi, L Zumalacárregui, O Pérez. Potencial Energético del Sistema de Secado del Bagazo de Caña en el Proyecto GERIPA. Conferencia Internacional de Energías Renovables. Cuba. Julio 2009.