

Energía a partir del biogás, gas de madera y sistemas fotovoltaicos en propiedades rurales

ENERGY FROM BIOGAS, WOOD GAS AND PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN RURAL PROPERTIES

Leila Rosa Carballo Abreu
Francisco Márquez Montesino
Universidad Pinar del Río
Facultad de Ingeniería Forestal
Departamento de Química
José Luz Silveira
Ederaldo Godoy Júnior
Universidad Estatal Paulista
Facultad de Ingeniería, Campus de Guaratinguetá
Departamento de Energía
Rolando Zanzi
Royal Institute of Technology
Departamento de Ingeniería Química de las Reacciones

RESUMEN

El presente trabajo considera aspectos técnicos y económicos para la implantación de sistemas híbridos para ser utilizados en propiedades rurales. El sistema consiste en un biodigestor anaerobio, un gasificador de madera, un motor de combustión interna, con sistema de cogeneración y un sistema fotovoltaico, para garantizar autosuficiencia en una propiedad. El propósito es obtener biogás, a partir del tratamiento anaerobio de excremento de ganado, gas de madera a partir de residuos de madera y aprovechar la energía solar. La potencia eléctrica requerida es de 5,8 kW, para convertir en autosuficiente la propiedad rural. La producción de biogás o gas de madera es insuficiente para satisfacer la demanda de energía, por esta razón es conveniente asociar un sistema fotovoltaico, de manera que durante el día la energía solar supla la demanda de energía y por la noche se trabaje con la generación de energía a partir del biogás o gas de madera. Los aspectos técnicos y económicos asociados con este sistema permiten la implantación de este tipo de sistema en localidades alejadas de las redes de energía eléctrica. La energía fotovoltaica puede ser utilizada en programas educacionales. El sistema puede convertirse en una importante contribución social y ambiental.

PALABRAS CLAVE

Biogás. Gas de madera. Sistema fotovoltaico. Cogeneración.

ABSTRACT

The present work support technical and economical bases for the implantation of hybrid system, for rural properties. The system consists in anaerobic biodisgester, gasifier of wood, engine, cogeneration system, and a photovoltaic system, for to guarantee auto sufficiency energetic in rural property. The proposal is to obtain biogas from the anaerobic treatment of excrements of 80 bovine cattle head, gas producer from wood residues, and approach solar incidence. The electric potency required in a property can be of 5, 8 kW in order to convert in auto sufficient the rural property. A production of biogas is insufficient for to satisfy energy in this community, for this reason is convenient associate one photovoltaic system, therefore during day, solar energy supply the energetic demand, at night works with biogas, Which was stored during the day, and gas producer. Technical and economical aspects associate with this system permits implantations in localities where the electric energy is impossible, the social contribution can be due the photovoltaic energy being utilized in educational programs. This system becomes an important environmental contribution.

KEYWORDS

Biogas. Wood gas. Photovoltaic. Cogeneration.

INTRODUCCIÓN

El presente siglo se ha convertido en el siglo de las alternativas, debido a la crisis de valores, crisis de paradigmas, crisis ambientales y crisis energéticas; también los nuevos paradigmas o referentes colocan los viejos conocimientos con modernas tecnologías al servicio del hombre, siendo necesario cambiar la posición del hombre dentro de los ecosistemas naturales, pasando de una mirada totalmente antropocentista a una posición ambiocentrista, ya que nuestros ecosistemas están rebasando sus capacidades de carga, pasando del límite de la resiliencia natural.

La comunidad científica ha tomado conciencia de que transformaciones son necesarias, desarrollando nuevas tecnologías con criterios ambientales y optimizando procesos que garanticen un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, una mayor eficiencia, con beneficios económicos, que contribuyan a la sostenibilidad de los recursos naturales.

Después de las crisis del petróleo de 1973 y 1979, se incrementó el interés por los recursos renovables, especialmente por la madera, recursos lignocelulósicos de las producciones agrícolas, biogás a partir de materia orgánica y otras formas de energía como la energía solar.

En el mundo la preocupación por las nuevas fuentes de energía se convirtió en programas nacionales. En los Estados Unidos se creó el Programa Nacional de Biomasa, en 1999, como parte del Departamento de Energía con el objetivo del desarrollo de alternativas ambientales para generar energía.

La Agencia Internacional de Energía llevó a cabo un proyecto sobre la Gasificación de la Biomasa y su objetivo fue el intercambio de información científica entre los Estados Unidos, Canadá, Dinamarca, Suecia, Noruega, Finlandia, Holanda y Reino Unido, para realizar proyectos referentes a la gasificación de la biomasa.

El proyecto Madera Brasil BIG-GT consistió en un gran proyecto de gasificación de madera, con tecnologías integradas a la producción de energía eléctrica, usando turbinas a biogás, operando en ciclos combinados.

Existen muchas propuestas en el mundo con esta finalidad, para investigar, desarrollar nuevas tecnologías y optimizar procesos colocando sistemas de cogeneración para aumentar la eficiencia energética, y disminuyendo el impacto ambiental por las emanaciones de sustancias tóxicas a la atmósfera.

Por otro lado la ampliación de los procesos metanogénicos naturales, a escala tecnológica cobra fuerza, cuando el hombre necesariamente tiene que buscar alternativas utilizando tecnologías limpias y con fines de saneamiento ambiental, pudiendo además convertirse en una fuente de energía ecológica, económica y renovable.

La energía solar una de las más limpias, renovables y útiles ha encontrado espacio en Programas nacionales de comunidades alejadas de las redes de electricidad, con el objetivo de suministrar energía a puestos de salud, escuelas, programas educativos u otros.

Sin embargo, segmentos de población de los países de América Latina alejados de las redes de transmisión de energía eléctrica, no disponen de electricidad o por lo menos no en cantidades suficientes para suplir la demanda, considerando que las alternativas individuales de gasificación o biodigestión, no siempre son viables, muchas veces porque no se dispone de la materia prima necesaria o de los recursos financieros en una comunidad, entonces sistemas integrados de pequeño porte pueden constituir soluciones alternativas y ecológicas.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema de energía en una comunidad rural alejada de las redes de transmisión de electricidad, a partir de sus propios recursos naturales, que constan de un minibiodigestor de tipo hindú, un gasificador de madera, un motor de combustión interna con sistema de cogeneración y un sistema fotovoltaico, para garantizar energía con eficiencia y sustentabilidad.

BIODIGESTIÓN

La comunidad seleccionada, para el diseño de un sistema de energía renovable, consta de 3 familias con 18 personas, una cría de ganado bovino estabulado de alrededor de 80 animales y residuos de madera. La materia orgánica más abundante es la excreta de ganado, sus potencialidades oscilan entre 700 y 800 kg por día, lo que propicia la obtención de biogás a partir del proceso de metanogénesis, con la sustitución de 7,25 kg de diesel en 5 horas de trabajo para producir 15 Nm³ de biogás, siendo necesario 430 kg, alrededor de 43 animales y un volumen total de 860 L, considerando que la dilución es 1:1 para una densidad de 1 kg / m³ de la materia orgánica - agua. La producción específica de biogás por kg de materia prima es de 0,037 - 0,04 m³ / kg, para animales de pequeño y mediano

porte, la temperatura de metanogénesis es de 30 - 35 °C y la relación carbono / nitrógeno de 18, según datos referenciados por Montalvo y Guerrero (2003). El biodigestor fue dimensionado atendiendo a las características relacionadas en la tabla 1.

Tabla 1 – Características del biodigestor Hindú

Tipo	Hindú
Material de construcción	ladrillos
Forma de construcción	cilíndrica
Presión de uso del gas	constante
Sistema de alimentación	diaria
Retirada de efluentes	automática
Tiempo de retención	30 días
Materia orgánica	Excremento de ganado bovino

Las dimensiones del biodigestor se calcularon según la metodología propuesta por el CEMIG, Minas Gerais.

Tabla 2 – Dimensiones del minibiodigestor hindu

Volumen de la cámara (m³)	Vc	25
Cociente diámetro altura	Du / Hu	0,8
Altura útil (m)	Hu	3,70
Diámetro útil (m)	Du	2,96
Altura real de la cámara de digestión (m)	Hrcd	4,00
Diámetro del gasómetro (m)	Dg	2,96
Volumen del gasómetro (m³)	Vg	12,62
Altura del gasómetro (m)	Hg	1,83
Altura real del gasómetro (m)	Hrg	2,08
Volumen de carga diaria (m³)	Vcd	0,84
Altura de la pared divisoria (m)	Hpd	1,92
Caño o guía (m)	Cg	4,12
Tanque de almacenaje de materia prima (m³)	T Alm.	1,5

El biogás, es una fuente de energía térmica para cocinar, o una fuente de energía eléctrica para la generación de fuerza motriz para bombas de irrigación, molinos de harinas, cortadoras de basura e iluminación. Indirectamente economiza tiempo para cocinar, disminuye la contaminación por la disminución de óxidos y dióxidos de carbono y de azufre, humaniza el trabajo para las poblaciones del campo. Por la colecta y transportación de leña, ayuda el mantenimiento de áreas forestales cubiertas, contribuye a la erosión de los suelos, ayuda al control de vectores, contribuye a la disminución del impacto de la crisis energética y mejora el equilibrio ecológico.

GASIFICACIÓN

Selección del tipo de gasificador y materia prima

La selección del gasificador se realiza atendiendo a las exigencias de limpieza del gas, con bajos contenidos de alquitrán, para que pueda ser utilizado en un motor de combustión interna, por esto se seleccionó un gasificador de flujo concurrente tipo Downdraft Imbert.

Se seleccionó madera de Eucaliptos de diferentes especies, de densidad aparente promedio entre 300 - 600 kg / m³.

La composición química de la madera varía de acuerdo con la parte del árbol que se trate (raíz, hojas, madera del fuste o corteza, madera de compresión, o de tensión), varía con la localidad, condiciones climáticas y características genéticas. Datos analíticos de diferentes laboratorios han ayudado a definir valores promedios para la composición química de la madera. Análisis ordinarios distinguen entre las maderas de latifoliadas (angiospermas) y coníferas (gimnosperma). Sin embargo estas técnicas no pueden ser usadas para diferenciar entre las especies. Existen dos tipos principales de componentes químicos, ligninas (18 - 35 %) y polisacáridos (65 - 75 %). Menores cantidades de sustancias extrañas y de sustancias minerales según, Pettersen (1984).

La química de la madera del Eucaliptos ha sido estudiada por Carballo y Orea (2004), su composición química varía presentando entre 19,21 % - 29,45 % de lignina; entre 40 - 49,74 % de celulosa y 28,37 - 37,61 % de hemicelulosas, la composición elemental varía con la especie y son importantes las determinaciones del contenido de minerales expresadas como cenizas, para la definición del tipo de gasificador. El contenido de cenizas en madera de Eucaliptos es menor al 0,5 %, según datos publicados por Carballo y Orea (2004). Determinaciones analíticas han demostrado que la madera de Eucaliptos, contiene de 46,90 - 48,00 % de carbono; 6,05 - 6,423 % de hidrógeno y 0,10 - 0,12 % de nitrógeno. El análisis inmediato demuestra que los contenidos de sólidos volátiles son del orden de 82,00 - 85,70 %; los contenidos de carbono fijo varían entre 13,90 - 17,94 % y las cenizas oscilan entre 0,06 - 0,38 % por estas razones se toman valores promedios de la composición química de la madera para calcular el Poder calórico superior e inferior.

Tabla 3 – Análisis elemental de la madera de Eucaliptos según Horta Nogueira y Silva Lora (2003)

Componente	Contenido en base seca	Contenido (20% m.c.)	Contenido (30% m.c.)	Contenido (38% m.c.)
C	49,00	39,2	34,3	30,76
H	5,87	4,696	4,109	3,580
O	43,97	35,176	30,779	27,26
N	0,30	0,24	0,21	0,186
S	0,1	0,08	0,07	0,062
Sustancias minerales	0,72	0,576	0,504	0,446

m.c. contenido de humedad

Los datos de los análisis químicos nos permiten

$$PCI_{gas} = 0,126 * (CO) + 0,358 * (CH_4) + 0,108 * (H_2) + 0,59 * (C_2H_4) + 0,637 * (C_2H_6) \quad (2)$$

El PCI del gas de madera calculado es 4.286,63 kJ / kg o 4.979 kJ / Nm³.

Tabla 4 - Características del combustible sólido, especificaciones técnicas

Combustible	Madera de Eucalyptus
Contenido de humedad	15 - 30 %
Dimensiones de las astillas	(1x0,5x0,5)x10 ⁻³ - (8x4x4)x10 ⁻³ m
Contenido de cenizas	0,3 - 0,5 %
Densidad aparente	300 - 600 kg / m ³
Gasificador	Downdraft concurrente
Agente gasificante	Aire
Tratamiento del gas	Enfriamiento, ciclón y filtro de arena
Eficiencia del gasificador	70 %
Eficiencia eléctrica	30 %
Poder calorífico inferior del gas	4.286,63 kJ / kg
Consumo específico de madera	0,9840 kg / kWh

Residuos de madera para el proceso de gasificación deben ser obtenidos en dimensiones de 15 - 40 mm con tamizaje, la uniformidad del tamaño de partículas puede aumentar la potencia de salida del motor en un 25,5 %, según Venselaar (1982).

Cálculos de los parámetros termodinámicos del proceso de gasificación

El cálculo de parámetros termodinámicos nos permiten inferir sobre el proceso de gasificación. El volumen de gases en el proceso de gasificación con madera de Eucaliptos fue calculado según las siguientes expresiones:

$$V_a^0 = 0,0889 * (Ct + 0,375 * St) + 0,275 * Ht - 0,0333 * Ot \quad (3)$$

calcular el poder calorífico inferior de la madera de Eucaliptos, según la siguiente expresión:

$$PCI = 339 * Ct + 1.030 * Ht - 109 * (Ot - St) - 25 * Wt \quad (1)$$

El valor obtenido para el 30 % de humedad es de 11.755,82 kJ / kg. El poder Calórico inferior del gas se determinó a partir de los datos de la composición del gas publicados por Horta Nogueira y Silva Lora (2003). La composición de los gases producto del proceso de gasificación de la madera de Eucaliptos fueron los siguientes: N₂ (52 %), CO (16,3 %), H₂ (12,5 %), CH₄ (4,4 %) y HC (1,2 %). La determinación del poder calorífico inferior de realizó según la ecuación 2

$$V_{RO_2} = 0,01866 * (Ct + 0,375 * St) \quad (4)$$

$$V_{H_2O} = 0,111 * Ht + 0,0124 * (Wt + W_{mp}) + 0,0161 * V_a^0 \quad (5)$$

$$V_{N_2} = 0,008 * Nt = 0,79 * V_a^0 \quad (6)$$

$$V_{O_2} + 0,2 * (\alpha - 1) * V_a^0 \quad (7)$$

$$V_g^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \quad (8)$$

$$V_g = V_g^0 + 1,0161 * (\alpha - 1) * V_a^0 \quad (9)$$

A donde B (10)

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2} + (\alpha_m - 1) * V_a^0$$

$$\alpha_m = \alpha + \frac{\alpha_{ii}}{2}; \alpha_{ii} = \alpha + \Delta\alpha; \Delta\alpha = 0,1; \alpha_m = 1,35$$

$$V_{gsec} = V_g = -V_{H_2O} \quad (11)$$

para r = 0,1 (12)

$$V_{grec} = V_g + r * V_{Igr}$$

$$V_{tg} = V_{ar} * V_g \quad (13)$$

Los volúmenes de aire o gases se multiplican por el factor de conversión, 1,0915 para obtener, valores a temperatura ambiente de 298 K.

Tabla 5 - Volúmenes de aire y gases en el proceso de gasificación de madera de Eucaliptos

Volumen de aire y gases calculado para gasificación	Volumen Nm ³ / kg	Volumen m ³ / kg	Masa kg
V _a ⁰	3,113	3,339	3,95
V _{ar}	4,047	4,418	5,13
V _{g(RO2)}}	0,643	0,702	
V _{agua_vap}	0,878	0,979	
V _{N2}	2,461	2,687	
V _{O2}	0,187	0,204	
V _{g,secos}	4,194	4,578	5,64
V _{g,real}	5,108	5,575	6,88
V _{g(tec)}	5,618	6,133	7,56
V _{l,real}	9,115	9,993	11,23
V _{g(tec)}	9,666	10,551	13,02

Para un coeficiente de exceso de aire de $\alpha = 1,3$, los resultados del volumen de aire real fueron de 4,42 m³ / kg, y el volumen de los gases que se producen son de 5,58 m³ / kg, los valores de la relación de masa de aire / masa de gases es de 5,83 similar al planteado en la literatura para madera de Eucaliptos con valor de 5,73, según Nogueira y Silva Lora (2003).

Los datos que se aprecian en la tabla 6, corresponden a los valores de entalpía de los gases en el proceso de gasificación y se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$I_{H_2O} = V_{H_2O} + rI_{H_2O} \quad (14)$$

$$I_g = I_{RO_2} + I_{H_2O} \quad (15)$$

$$I_{gr} = I_{RO_2r} + I_{H_2Or} \quad (16)$$

$$I_g^0 = V_{RO_2} * i_{RO_2} + V_{H_2O} * i_{H_2O} + V_{N_2} * i_{N_2} \quad (17)$$

$$I_a^0 = V_a^0 * i_{aire} \quad (18)$$

$$I_g = I_g^0 + (\alpha_{II} - 1) * I_a^0 \quad (19)$$

donde: $\alpha_{II} = 0,95$ (20)

$$I_{cen} = 0,01 * A^t * a_{II} * i_{cen}$$

$$I = I_g + I_c \quad (21)$$

$$I_r = (1+r) * I \quad (22)$$

Tabla 6 - Valores de Entalpía calculados para la gasificación de madera de Eucaliptos a temperatura de la zona de reducción de 1.073 K

Entalpía de los gases de la gasificación	Símbolos	Valores kj / kg
Entalpía de la ceniza	I _c	3,68
Entalpía del gas	I _g	6.338,39
Suma de la entalpía	I _g + I _c	6.342,07

Los valores de entalpía calculados en el proceso de gasificación de la madera para la temperatura de reducción en el proceso de gasificación, son valores adecuados entre 4 - 6,3 MJ / kg, los valores de entalpía de la ceniza son bajos, también son bajos los contenidos de cenizas en la madera lo que hace aún más útil este tipo de madera para el proceso de gasificación, disminuyendo los procesos de fusión de las cenizas, los contenidos de sustancias alcalinas y la formación de mezclas eutécticas que disminuyen el punto de fusión de las mismas.

Los valores encontrados se aprecian en la tabla 7. Las fracciones se determinan mediante las ecuaciones 14, 15 y 16, y son útiles para determinar los volúmenes de gases con o sin recirculación.

Tabla 7 - Fracciones volumétricas de los gases

Fracciones volumétricas de gases	Sin recirculación	Con recirculación
r _{H2O}	0,172	0,189
r _{(RO2)}}	0,126	0,138
r _{gases totales}	0,328	0,298

En la tabla 8, se muestra el valor de temperatura calculado, el cual se encuentra en el rango de temperaturas para la zona de oxidación, los altos valores se deben a que las reacciones de oxidación son fuertemente exotérmicas, elevando la temperatura. Para evitar puntos fríos se deben elegir bien la admisión

de aire y características del gasificador, disminuyendo el diámetro de la garganta y adecuada distribución de las toberas, según se muestra en la tabla 10. Los valores obtenidos nos permiten hacer consideraciones para el diseño de un gasificador para este tipo de biomasa.

Tabla 8 - Valores obtenidos para el cálculo de la temperatura de gasificación

Parámetros	Valores
Q_{aire} (kJ / kg)	133,87
Q_c (kJ / kg)	32,50
Q_{disc} (kJ / kg)	11.922,19
$t_{\text{teórica}}$	1.403 °C
$T_{\text{real de combustión (20 \%)}}$	1.122,4 °C

Dimensiones del Gasificador de Flujo Concurrente, Downdraft Imbert

Tabla 9 - Dimensiones del gasificador de madera de tipo Concurrente

Tipo de gasificador	F_3
Consumo mínimo de madera kg / h	5 kg / h
Consumo máximo de madera kg / h	12 kg / h
Producción de gas de madera Nm^3 / h	5,58 m^3 / kg
Dimensiones de las astillas	$(1 \times 0,5 \times 0,5) \times 10^{-3} \text{ m} - (8 \times 4 \times 4) \times 10^{-3} \text{ m}$

Tabla 10 - Principales dimensiones de la zona de reducción del gasificador

Dimensiones	Símbolos	Valores
Diámetro de la cámara de combustión (m)	d_r	0,1572
Diámetro de la garganta (m)	d_t	0,0524
Altura del plano de las toberas (m)	h_{nt}	0,1050
Altura entre la rejilla y la sección más estrecha de la garganta (m)	h_r	0,0831
Número de toberas (unidades)	n	5
Diámetro de las toberas (m)	d_n	0,0060
Longitud de las toberas (m)	l_n	0,0500

Tabla 11 - Dimensiones de la cámara de secado (m)

db	627
hb	0,790
h_1	0,340
h_2	0,220
Volumen total en m^3	0,155

Los valores obtenidos para dimensionar el gasificador son valores empíricos, según las Normas Suecas de Ciencias Técnicas, los mismos se han extrapolado a gasificadores de menores portes.

Los valores de B_g , carga del hogar se define como la cantidad de gas pobre reducida a condiciones normales de presión y temperatura dividida por el área de la superficie de la garganta en la circunferencia mínima, los valores considerados son de 0,15, muy inferiores a los utilizados en algunos gasificadores del Tipo Downdraft, por lo que deberá tomarse cuidado en el diseño y construcción de forma que esté bien aislado.

La velocidad de entrada de aire por las toberas debe ser del orden de 30 a 35 m^3 / s . El diámetro a la altura de la entrada de aire debe ser 10 cm mayor que el diámetro de la garganta. La altura de la zona de reducción debe ser superior a 20 cm. La altura del plano de las toberas de entrada de aire debe ser 10 cm sobre el estrechamiento máximo.

Características del Motor de Combustión Interna

Tabla 12 - Características del Motor de Combustión Interna NS_B 90 Yanmar

Tipo de motor	NSB 90 Yanmar
Combustible	diesel
Número de cilindros	1
Potencia kW (cv) / rpm no limitada	4,7 (6,5) / 1.800 - 6,6 (9,0) / 2.400
Potencia kW (cv) / rpm limitada	5,8 (8,0) / 1.800 - 7,7 (10,0) / 2.400
Sistema de combustión	Ante cámara
Lubricación	bomba
Refrigeración	agua
Tanque de combustible	9,5 L
Costo US \$	5.000 - 5.800

El costo de estos motores usados en el mercado brasileño se encuentra en el orden de US \$1.000.

$$F_{\text{aire gasMCI}} = \frac{1}{2} * \text{rpm} * V_{\text{desplazado}} \quad (23)$$

$$60 * 1.000$$

$$F_{\text{gas}} = \frac{10}{21} * F_{\text{aire gasMCI}} \quad (24)$$

donde: $f = 0,8$ Eficiencia Volumétrica del MCI (25)

$$F_{realgas} = F_{gas} * f$$

$$Pot_{termicagas} = F_{realgas} * PCB_{gas} \quad (26)$$

$$Pot_{mecaricasal} = Pot_{termicagas} * 0,28 \quad (27)$$

0,28 es la eficiencia aproximada del motor con un radio de compresión de 9,5:1

$$P_{Emax} = P_{mecarica} * 0,8 \quad (28)$$

Tabla 13 - Valores calculados de potencia del Motor para operar con gas de madera

Parámetros calculados	Valores obtenidos
Flujo _{aire-gas} (m ³ / s)	0,00405
Flujo _{gas} (m ³ / s)	0,0019
Flujo _{real de gas} (m ³ / s)	0,00154
Potencia térmica del gas (kW)	7,68
Potencia mecánica máxima $h= 0,28$ (kW)	2,15
Potencia eléctrica máxima de salida para $\cos\phi = 0,8$ (kW)	1,72

Los valores calculados para la utilización del biogás en un motor de combustión interna, son Potencia térmica máxima de 18,64 kW; Potencia mecánica máxima de 5,2 kW; mientras que la potencia máxima de salida es de 4,17 kW. La utilización del biogás produce una mayor potencia eléctrica teórica de salida, considerando el poder calorífico del biogás de 17,76 MJ / kg.

COGENERACIÓN

Los valores que se muestran en las tablas 14 y 15 son los obtenidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_c = \dot{m}_{gas} * cp_{gas \text{ de escape}} * \Delta T_{gas} \quad (29)$$

$$E_{agua} = \dot{m}_{agua} * cp_{agua} * \Delta T_{agua} \quad (30)$$

$$E_{comb} = \dot{m}_{comb} * PCI_{comb} \quad (31)$$

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{comb} \quad (32)$$

$$\dot{m}_{air} + \dot{m}_{gas \text{ de madera}} = \dot{m}_{gas} \quad (33)$$

$$\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{biogas}} = 12 \quad (34)$$

$$\eta_{Tc} = \frac{E_{agua}}{E_c} = 0,8 \quad (35)$$

$$\eta_{\theta} = \frac{E_p}{E_{comb}} \quad (36)$$

$$\eta_{\theta w} = \frac{E_{agua}}{E_{comb}} \quad (37)$$

$$\eta_{global} = \eta_{\theta} + \eta_{\theta w} \quad (38)$$

La utilización de intercambiador de calor produce diferencias de temperaturas de 220 °C para los gases de escape y 35 °C para la agua.

Los sistemas de cogeneración asociados a la producción de energía eléctrica, implican un costo adicional, pero se recobra energía en forma térmica lo que mejora la eficiencia del proceso y la energía excedente puede ser utilizada en el secado de las astillas de madera para a la vez hacer más eficiente el proceso de gasificación.

Tabla 14 - Valores para el uso de gas de madera para un Motor de Combustión Interna, con sistema de cogeneración

Parámetros calculados	Valores obtenidos para el uso de biogás	Valores obtenidos para el gas de madera
Masa del combustible diesel (kg / h)	1,45	1,45
E_{comb} diesel (kW)	18,58	18,58
h_{ge}	0,3122	0,3122
E_{comb} gas de madera (kW)	22,25	20,91
Masa de gases de escape (kg / h)	34,90	72,24
Masa de aire (kg / h)	32,21	65,37
E_c (kW)	1,97 (r=12)	4,83 (r = 9,5)
E_{agua}	1,57	3,86
h_{ge} gas	0,2889	0,277
h_{ge} agua caliente	0,1734	0,185
h_{g} global	0,434	0,462

SISTEMA FOTOVOLTAICO

El sistema fotovoltaico fue dimensionado, utilizando un software solar 1.1 desarrollado por Paolo y Alonso (2003), el proyecto es constituido de 197 paneles Solon Alpha con una potencia instalada de 13.790 W_p a un costo de US\$ 53.012,70.

ANÁLISIS ECONÓMICO

(39)

$$C_{\text{ostogas}} = \frac{I_g}{H * E_{\text{gas}}} + \frac{C_{\text{ostoleña}} * E_{\text{leña}}}{E_{\text{gas}}} + \frac{C_{\text{ostoleña}} * E_{\text{leña}}}{E_{\text{gas}}}$$

(40)

$$C_{\text{ostoelectricidad}} = \frac{I_{\text{PMG}} * f}{H * E_p} + \frac{C_{\text{ostogas}} * P_{\text{el}}}{E_{\text{gas}}} + C_{\text{Manpmg}}$$

(41)

$$C_{\text{ostoañualiente}} = \frac{I_{\text{HE}} * f}{H * E_{\text{año}}} + C_{\text{ostogas}} * \frac{P_{\text{el}}}{E_{\text{año}}} + C_{\text{ManTC}}$$

$$GP_{\text{el}} = E_p * H * (P_{\text{el}} - C_{\text{el}}) \quad (42)$$

$$GP_{\text{año}} = E_{\text{año}} * H * C_{\text{añoaliente}} \quad (43)$$

$$R = GP_{\text{el}} + GP_{\text{año}} \quad (44)$$

Las ecuaciones utilizadas en la obtención de los costes en el uso del biogás son las mismas, cambiando los costes de la madera, leña por biogás así como la manutención de los equipos.

Los costos obtenidos para la electricidad cuando se utiliza biogás o gas de madera para alimentar un motor de Combustión Interna son similares, sin embargo en el análisis de los costes no se ha considerado el valor del coste ambiental, el cual es calculado para el uso de la madera entre 0,1 - 2,7 centavos de US\$ / kWh, según n datos publicados por Acord (2004).

Tabla 15 - Costes de la electricidad y agua caliente para la producción de electricidad con sistema de cogeneración

Tasa de Interés anual (%) para K = 2	Coste de electricidad para el gas de madera US\$ / kWh	Coste de agua para gas de madera US\$ / kWh	Coste de electricidad para biogás US\$ / kWh	Coste de agua, para biogás US\$ / kWh
4	0,1303	0,0045	0,1303	0,0038
8	0,1308	0,0047	0,1309	0,0039
12	0,1317	0,0050	0,1318	0,0040

Los valores encontrados para el precio de la electricidad para el gas de madera en uso, son adecuados, considerando el costo del gas 0,0092 US\$ / kWh, diferenciando el valor de la leña y las astillas de madera, siendo de 20 y 25 US\$ / t mientras que el costo del biogás 0,0040 US\$ / kWh, los valores deter-

minados para uso del biogás en motor de combustión interna para producir electricidad, son ligeramente menores a los obtenidos en el Proyecto de la Universidad de Perugia en Italia y la UNESP, para un coste del gas similar y valores de 0,23 - 0,25 US\$ / kWh.

VENTAJAS DEL SISTEMA DE ENERGÍA PROPUESTO

Utilización de materia prima renovable, con reducción de la dependencia de combustibles fósiles, obtención de energía eléctrica y energía térmica. Utilización de la energía térmica excedentes para secado de las astillas de madera, disminución de las emisiones de gases a la atmósfera hasta valores muy bajos, cercanos a cero; creación de nuevas fuentes de empleo, nuevas oportunidades de negocio para la agricultura y diversificación de la producción agrícola y forestal.

IMPACTO AMBIENTAL

El sistema diseñado permite disminuir las emanaciones de gases de efecto invernadero, debido a la sustitución de combustibles fósiles; ampliar a escala tecnológica la metanogénesis de excremento de ganado bovino, eliminando esta importante fuente de contaminación ambiental que contribuye 21 veces más que el dióxido de carbono a la contaminación atmosférica y eliminación de los óxidos de nitrógeno que aparecen producto del uso de fertilizantes químicos, se aportará un lodo estabilizado que disminuye la utilización de fertilizantes químicos. La digestión anaerobia ayuda al control de enfermedades tales como E. coli, Tuberculosis, Salmonela, Streptococcus, Brucelosis, encontrada en ganado Vacuno.

CONCLUSIONES

La utilización de materias primas renovables y tecnología de bajo impacto ecológico, asociado a sistemas de cogeneración puede constituir una alternativa atractiva desde el punto de vista económico para la generación de energía eléctrica y energía térmica en

comunidades rurales, compitiendo con la combustión directa de la madera.

La propuesta, es encomiable, en la medida que se coloca al servicio del hombre mejoras técnicas, viables desde el punto de vista económico y se eleva el nivel de vida de segmentos de poblaciones, con criterios ambientales.

El estudio realizado demuestra que tanto la biodigestión de la materia orgánica como la gasificación pueden ser utilizadas para la obtención de energía eléctrica, con costes similares, para una tasa de interés del 8 % y un período de retorno de 2 años trabajando 1825 horas al año, sin embargo, la producción de electricidad con gas de madera el costo aumenta ligeramente debido a determinadas emanaciones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, siendo el biogás más atractivo por la disminución del impacto ambiental, al disminuir las emanaciones de gas metano a la atmósfera, y la obtención de un lodo estabilizado que puede ser utilizado como fertilizante.

El trabajo sienta pautas en la metodología para el diseño de sistemas de energía renovables de pequeño porte.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi mayor gratitud a la Comunidad Europea por los esfuerzos realizados, el empeño y el financiamiento del Proyecto Alfa II -0442, y a la persona del Dr. Rolando Zanzi por la coordinación de este magnífico proyecto, Agradezco a La Universidad Estatal Paulista, en el Campus de Guaratinguetá por ser recibida en la persona del Dr. José Luz Silveira. A la Universidad de Pinar del Río, Cuba, por propiciar el intercambio de experiencias.

REFERENCIAS

ACORD, B. R. *Animal and plant health inspection service*. Doc. 04875. Sitio disponible en <<http://www.pesticide.net>>. Visitado en 14-jan. 2004.

CARBALLO, L.; OREA, U. Composición química de tres especies de Eucaliptos. *Revista Ciencias Forestales y Ambientales*, Chapingo, dec. 2004.

HORTA NOGUEIRA, L. A.; SILVA LORA, E. E. *Dendroenergía. Fundamentos e aplicações*. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 2003.

MONTALVO, S.; GUERRERO, S. *Tratamiento anaerobio de residuos*. Valparaíso: Editora Talleres Gráficos de Fermín

Pasten P., 2003.

OREA, U.; CARBALLO, L.; CAPLE, R. *Composición Química de la madera y corteza de tres especies de Eucaliptos, para su aprovechamiento en la industria de celulosa y papel*. 2000. 100 f. Tesis (Doctorado), La Habana (Cuba) e Duluth (Minnesota, USA), 2000.

PETTERSEN, R. C. *The chemistry of solid wood*. Madison (WI): US Department of Agriculture, Forest service, Forest Products Laboratory, 1984.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E. Thermo-economic analysis method for optimization of combined heat and power systems - Part II. *Progress in Energy and Combustion Science*, London, v. 30, p. 673-678, 2004.

THE SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES. *Generator gas. The Swedish experience from 1939 - 1945*. Stockholm: The Swedish Academy of Engineering Sciences, 1979.

VANSELAAR, J. *Design rules for downdraught gasifiers. A short review*. Indonesia: IT Bandung, 1982.