

GENERACIÓN DE ENERGÍA CON BIOGAS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS EN PLANTAS AGROINDUSTRIALES LA LIBERTAD - PERÚ

Raúl Paredes Rosario, Master of Science
Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú, rparedes_rosario@yahoo.es

Marcos Baca López, Master of Science
Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú, mbl@upnorte.edu.pe

RESUMEN

En la costa norte peruana con la irrigación CHAVIMOCHIC, se convirtieron tierras desérticas en cultivables, generando plantas de productos de exportación: espárragos, alcachofas, marigold, páprika, papaya, etc.

Un componente importante del proceso es energético, representando 80 - 85% del total, ocupa el tercer lugar de costos de elaboración. La energía eléctrica se obtiene de generadores Diesel y el vapor de calderas pirotubulares.

Carga eléctrica: 500 kw y térmica: 10 000 kg/h vapor, emitiendo cientos de toneladas mensuales de CO₂.

Se propone utilizar residuos agrícolas, 70 - 80 Toneladas métricas / día / planta, y obtener biogas. Una parte será utilizada en turbina (ciclo Brayton) accionando un generador eléctrico. La otra, en calderas, generará vapor de procesos (ciclo abierto Rankine).

Beneficios a ser obtenidos del ciclo combinado:

- Eliminar dependencia del petróleo Diesel y petróleo residual durante el año (6500 horas / año).
- Reducción 20 - 25 % de CO₂.
- Generación de puestos de trabajo en corte, transporte y conversión de residuos agrícolas en biogas, 80 - 85 personas / planta

Ahorros a ser obtenidos: 800 000 \$ USA / año.

Costos: inversión en equipos 700 000 \$ USA, instalación 100 000 \$ USA, operación 90 000 \$ USA / año y mantenimiento 100 000 \$ USA / año.

Capacidad promedio de planta termoeléctrica en ciclo combinado con biogas: 700 kw (850 kVA).

PALABRAS CLAVE:

COGENERACIÓN, CICLO BRAYTON, BIOMASA VEGETAL, BIOGAS, GASIFICACIÓN.

INTRODUCCIÓN

El Perú, como muchos países de nuestro continente enfrenta varios desafíos, siendo tal vez el más importante su integración en la economía mundial, para lo cual requiere elevar cada vez más, su nivel de competitividad. En los últimos años en el Perú se ha efectuado una reforma económica, que impulsa su modernización. Una medida es el sinceramiento del mercado energético, con precios y tarifas en sus valores reales, lo que permite que los agentes productivos realicen ahorro de energía.

El sector agrícola liberteño se compone de 65% de pequeños productores con unidades agropecuarias menores de 5 Has, sólo el 4.5% de propietarios poseen parcelas mayores de 20 Has. Las nuevas empresas agrarias establecidas con Chavimochic, se caracterizan por ser grandes unidades agrarias con uso de

modernas tecnologías de riego y producción, para cultivos de agroindustria y agro-exportación. Éstos demandan variada superficie de siembra según el tipo de producto, siendo significativo la caña de azúcar (cuya área de cosecha está por encima de 24,000 Hás anuales, 45% del área total nacional), el espárrago (con 5,600 Hás anuales, 48% del total nacional), los frutales como palta (500 Hás), mango (200 Hás), vid, lúcumo de seda, entre otros.

OBJETIVOS DEL PROYECTO:

OBJETIVO PRINCIPAL:

Reducir la dependencia del petróleo y disminuir los riesgos de contaminación ambiental

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Aumentar la seguridad de un suministro de energía sostenible
- Ser una alternativa interesante para la retirada de tierras obligatoria
- Generación de empleo en el área rural
- Introducir nuevas tecnologías energéticas, limpias y económicas

LA ENERGÍA RENOVABLE EN CONTEXTO

1). - EN EL MUNDO

- A nivel mundial el suministro total de energía primaria es de 9,958 Mtep de los cuales la **energía renovable representó un 13.8%**, es decir unos 1,372 Mtep (IEA, 2002)
- De las energías renovables cerca del 16.5% fue hidroeléctrico, 3.7% incluye a la geotermia-energía solar y eólica, y un **79.8% los combustibles renovables y desechos (Biomasa)**
- Las energías renovables ocupan el segundo lugar en generar electricidad (19%), luego del carbón (39%), adelante de la energía nuclear (17%), gas natural (16%) y derivados de petróleo (9%)

2). - EN AMÉRICA LATINA

- Energía primaria en el 2002 representó 456 Mtep (Mega toneladas equivalentes de petróleo) es decir sólo un 4.57% del consumo mundial, y las **energías renovables representaron cerca del 27.9%** (IEA, 2002)
- Del total de energías renovables cerca del 37.5% fue hidroeléctrico, 1.3% incluye a la geotermia-energía solar y eólica, y un **61.3% los combustibles renovables y desechos (biomasa y otros)**

3). – EN PERU

- El 76% de la electricidad del Perú es generada por hidroeléctricas (Sociedad Geológica Peruana). Según Osinerg, es necesario invertir en nuevas plantas de generación de energía eléctrica a 150 MW/año

BIOMASA

La biomasa es energía renovable, es “el conjunto de materia orgánica de origen vegetal o animal”, que engloba a la fracción biodegradable de los residuos agrícolas (vegetales y animales), forestales y las industrias derivadas del sector agrícola y forestal.

Producción total de biomasa en la biosfera: 40×10^9 toneladas/año $\cong 2,425 \times 10^{18}$ Kj

INDUSTRIALIZACION DE LA BIOMASA VEGETAL

Los biocombustibles reemplazan los combustibles fósiles sin ninguna emisión neta de CO₂, aparte de la energía consumida a través del uso de combustibles fósiles en la preparación agrícola e industrial del

biocombustible. La energía de combustibles fósiles requerida en procesamiento es baja (10 a 20 %) de la energía contenida del biocombustible, resultando una alternativa para cubrir la demanda humana de combustibles mientras se desaceleran las emisiones de CO₂ (Turbollow & Perlack 1991).

Ciertos estudios (Nilsson & Schopfhauser 1995, Trexler & Haugen 1995) evalúan la cantidad de tierra disponible, tasas viables de plantación, tasas de crecimiento y la rotación. En los países de latitudes altas y medias, habrá 215 millones de hectáreas, y 130 millones en los tropicales. Esta última cifra es sólo el 6 % de la tierra conveniente por problemas culturales, sociales y económicos añadidos. Otro estudio (Winjum et al 1992) estima una superficie de 375 a 750 millones de hectáreas. La tasa de plantación para Sudamérica, de 0,18 Mha/año (Nilsson & Schopfhauser 1995) es inferior a la forestación anual llevada a cabo sólo en Brasil durante los años 70 y 80, cuando existían incentivos financieros para ello.

BIOMASA VEGETAL PARA PRODUCCION DE BIOGAS

Existen experiencias importantes con residuos como cáscara de coco, tuzas de maíz, con desempeños satisfactorios en gasificadores de lecho fijo. Los residuos de coco forman aglomerados; sin embargo el desempeño de los sistemas mejora cuando el material se mezcla con madera.

La mayoría de las pajas de cereales presentan problemas en gasificadores de tipo invertido, debido al alto contenido de cenizas (igual o superior al 10%), que propicia la formación de escorias.

1. – BIOMASA DEL TIPO AZUCARADA

Hidratos de carbono, Monosacáridos: Glucosa, Fructosa, Ejemplos: Pulpa de frutas como papaya

2. – BIOMASA DEL TIPO AMILÁCEA

Hidratos de carbono:

- Inulina, Ejemplos: Tubérculos, rizomas de dalia, achicoria
- Almidón: Granos de cereal. Tubérculos de patata

COMPOSICION QUIMICA DE LOS RESIDUOS VEGETALES

Para el proyecto se tiene una variedad de residuos vegetales, los cuales tiene, en promedio una composición aproximada de:

Carbono:	52%
Hidrógeno:	6%
Oxígeno:	41%
Nitrógeno:	0.1%

Al momento de la cosecha estos residuos vegetales contienen una humedad de 70 a 80 %, por lo que se deberá secar previamente en el campo por dos a tres días hasta obtener 30 % de humedad.

EL BIOGAS

Biogas es la mezcla de metano en una proporción de 50% a 70% y dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.

COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS:

Los principales componentes del biogas son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), su composición varía de acuerdo a la biomasa, siendo aproximadamente la siguiente (Werner et al 1989):

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DEL BIOGAS

	CH₄	CO₂	H₂ – H₂S	OTROS	BIOGAS 60/40
Proporciones % Volumen	55 - 70	27 - 44	1	3	100
Valor Calórico: MJoule / m ³	35.8	----	10.8	22	21.5
kCal/m ³	8600	----	2581	5258	5140
Ignición % en Aire	5 - 15	----	-----	-----	6 – 12
Temperatura Ignición °C	650 - 750	----	-----	-----	650 – 750
Presión Crítica en MPa	4.7	7.5	1.2	8.9	7.5 – 8.9
Densidad Nominal g/l	0.7	1.9	0.08	-----	1.2
Densidad Relativa	0.55	2.5	0.07	1.2	0.83
Inflamabilidad Vol. % Aire	5 - 15	----	-----	-----	6 - 12

El CH₄, principal componente del biogas, le confiere las características de combustible.

El valor energético del biogas por lo tanto estará determinado por la concentración de metano - alrededor de 20 – 25 MJ/m³, comparado con 33 – 38MJ/m³ para el gas natural (Werner et al 1989).

USO INDUSTRIAL DEL BIOGAS DE BIOMASA VEGETAL

El uso que se le daría al gas de la biomasa de residuos vegetales producto de la cosecha de frutas, tubérculos que forman parte de productos de exportación como son: palta, papaya, alcachofa, pimentón, espárrago, páprika, etc. Se encuentra en las Plantas de procesamiento, específicamente en el área de generación de vapor saturado y área de generación de energía eléctrica (actualmente la EE es adquirida de la red nacional), en un sistema de cogeneración y de interconexión eléctrica, BIG / CC

A. CALOR DE PROCESOS

El uso de gas combustible con bajo poder calorífico se aplicaría donde es sencilla la conversión de hornos, calderas, secaderos, etc que operen con combustibles líquidos, como es el caso de las Plantas Térmicas de la Agroindustria liberteña. El biogas también se emplearía como combustible en calderas pirotubulares para generar vapor saturado necesario en el proceso industrial, para producción de agua caliente y calentamiento en procesos.

B. PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA

El proyecto prevé un sistema de cogeneración de energía en ciclo Brayton, buscando la mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía del biogas. La potencia mecánica del eje de la turbina de gas acciona un generador eléctrico trifásico. En intercambiadores de calor ubicados a la salida de los gases de escape, se recupera la energía térmica liberada en la combustión. Estos sistemas están condicionados por la rentabilidad final. Sin embargo representa la utilización más racional del biogas ya que se obtiene una forma de energía extremadamente dúctil como la electricidad al mismo tiempo que una fuente de calor muy necesaria para la calefacción.

Algunos requisitos para operación en una turbina a gas:

- Se requiere en el gas un valor calorífico superior a 4200 kJ/m³
- El gas debe estar libre de alquitrán y de polvo (para reducir al máximo el desgaste de la máquina)
- Debe frío para lograr la máxima admisión de gas en la turbina y la mayor potencia de salida.

C. - USO DEL BIOGAS EN MOTORES DE COMBUSTION INTERNA

En los motores de Ciclo Otto el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores arrancan con nafta y luego trabajan con un 100% de biogas con una merma de la potencia máxima del 20% al 30%.

A los motores de Ciclo Diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control manteniendo el sistema de inyección convencional, de modo que funcionen con distintas proporciones de biogas diesel y se conviertan fácil y rápidamente de un combustible a otro, haciéndolos muy confiables.

Para el caso de la Planta Industrial, se puede prever que el biogas puede accionar los motores de combustión interna que accionan los generadores Diesel.

COGENERACION DE ENERGIA CON TECNOLOGIA BIG/CC EN LA AGROINDUSTRIA LIBERTEÑA
CON BIOGAS DE RESIDUOS VEGETALES

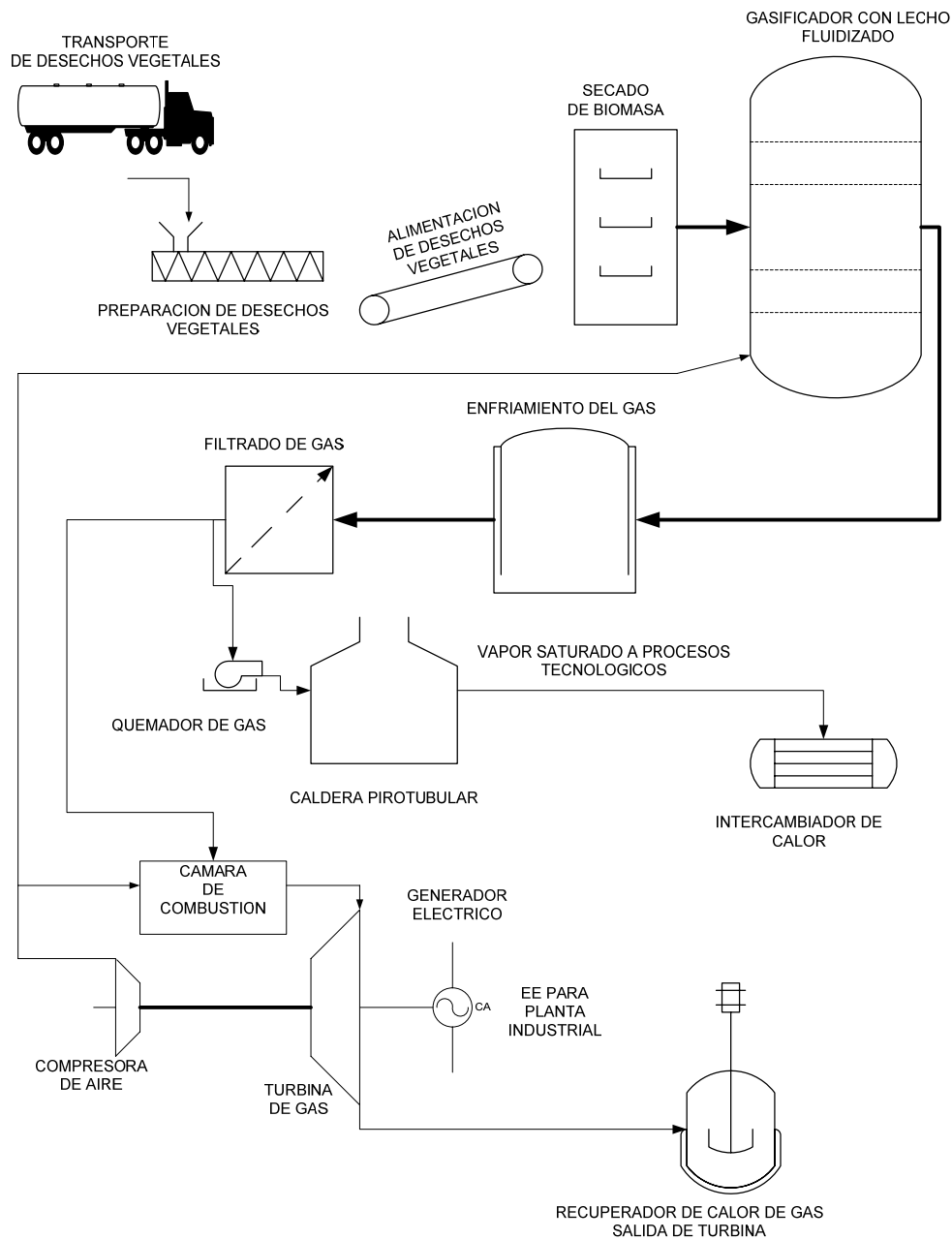
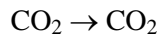
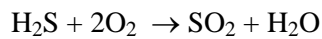
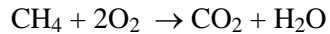


FIGURA. 1: ESQUEMA COGENERACION CON TECNOLOGIA BIG / CC

CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

PRINCIPIOS DE LA COMBUSTIÓN DEL BIOGAS

El biogas mezclado con aire se quema en muchos artefactos descomponiéndose principalmente en CO_2 y H_2O . La combustión perfecta, puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas:



El aire teórico es el 21% pero debe ser mayor para lograr una buena combustión. La relación aire-gas se ajusta aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior. Debido al contenido de CO_2 , el biogas tiene una velocidad de propagación de la llama lenta, 43 cm/seg y tiende a escaparse de los quemadores. La presión para un correcto uso del gas es de 7 a 20 mbar.

En la combustión real, llevada a cabo en el gasificador el resultado es un gas de poder calorífico superior a 20.900 KJ/Kg y un sólido convertido en carbón con un volumen del 5% del material original.

GASIFICACION DE LA BIOMASA

Es la conversión de residuos sólidos y líquidos mediante la descomposición termoquímica de la materia orgánica a altas temperaturas en un combustible gaseoso con la adición de reactantes oxidantes.

Objetivo de la gasificación: Transferir la máxima energía química desde la alimentación a la fracción gaseosa y recibir un alto rendimiento del gas combustible compuesto principalmente de productos gaseosos de bajo peso molecular.

Fases de la gasificación de la biomasa:

1. Calentamiento y secado de la biomasa
2. Desgasificación de la biomasa
3. Oxidación parcial de la biomasa y reducción parcial de los productos de oxidación (CO_2 y H_2O a CO e H_2) y simultáneamente, gasificación del carbón sólido a CO .

Antes de que tenga lugar cualquier reacción química, es evaporada el agua a temperaturas sobre 200°C . El vapor es más tarde reducido a H_2 o deja el gasificador como parte del producto gaseoso. Como se necesita una cierta cantidad de energía para calentar y secar la biomasa, es preferible tener la alimentación con un contenido de humedad inferior al 30%.

En el presente caso, el calor es proporcionado por la combustión parcial de la alimentación mediante la adición de aire, el cual es también agente oxidante para la conversión del carbón sólido en CO gaseoso.

Con aire como agente gasificante, se alcanzan temperaturas de 800 a 1000°C .

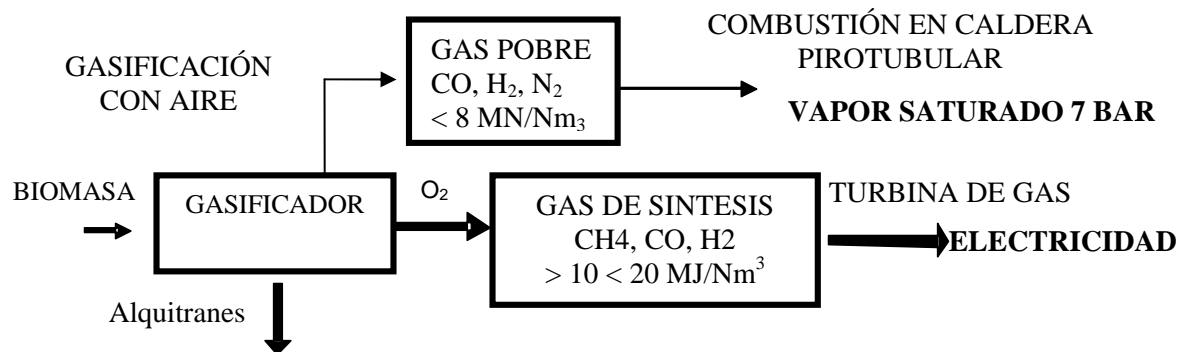


FIGURA 2: GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA DE RESIDUOS VEGETALES

LA PIRÓLISIS:

Es la combustión incompleta de la biomasa, a unos 500 °C, se utiliza para producir carbón vegetal y el llamado gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros. Este gas de débil poder calorífico, sirve para accionar motores diesel, o para producir electricidad, o para mover vehículos. Una variante de la pirólisis, llamada pirólisis flash, lleva a 1000°C en menos de un segundo, asegurando una gasificación casi total de la biomasa.

La gasificación total se obtiene con oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis.

ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA DE GASIFICACIÓN

La tecnología disponible comercialmente (Internacional Cane Energy News 1994) es la de BIG/CC o Ciclo combinado de Biomasa y Turbina a Gas. Se elige esta tecnología por mayor eficiencia y confiabilidad. La Industria azucarera brasileña utiliza esta tecnología. España usa la gasificación del carbón. La BIG / CC Tiene una eficiencia mayor en 50% que las de ciclo abierto.

EQUIPO UTILIZADO: GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Se usará el gasificador de lecho fluidizado, por que la potencia necesaria será mayor a 1 MW.

Fueron originalmente desarrollados para gasificar el carbón y han sido adaptados para la conversión de biomasa. En estos equipos, el agente gasificante se alimenta por la parte inferior del gasificador a una velocidad suficiente para fluidizar la alimentación.

En este equipo térmico no existen diferentes zonas de reacción. El secado, la oxidación, la pirólisis y la reducción se dan lugar en la misma área.

Los lechos fluidizados tienen altos niveles de transferencia de masa y energía y proveen una buena mezcla de la fase sólida, causando que las reacciones sean intensas, el tiempo de residencia de las partículas es pequeño y la temperatura es más o menos constante en el lecho.

El lecho es calentado y el material es alimentado al reactor al alcanzar la temperatura adecuada.

Para minimizar el escape de alquitrán por soplado, el gasificador incluirá un ciclón interior.

Las partículas de cenizas serán transportadas por la parte superior del gasificador.



FIGURA 2: PROCESOS EN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

REACCIONES EN EL GASIFICADOR

En el gasificador se produce reacciones de pirólisis (se descompone el sólido original en una mezcla sólido-líquido-gas), oxidación (reacciona el agente gasificante y libera la energía calorífica que mantiene el sistema) y reducción o gasificación (reducción del sólido remanente y se convierte en gas).

En el interior de un gasificador existen distintas zonas: la primera es de secado, la segunda de eliminación del agua de constitución, donde el sólido se calienta ya a unos 450°C, luego alcanza los 600°C y entra en la zona de gasificación propiamente dicha, en la que, primero se produce la reducción de gases como CO₂ y H₂O para formar CO y H₂ y, por último, en la zona inferior se produce el contacto del sólido casi descompuesto con los gases de reacción, produciéndose las últimas reacciones de oxidación.

Los gases liberados en la zona de pirólisis y de gasificación pasan por la zona de alta temperatura de la zona de oxidación final, eliminando alquitranes.

El proceso de gasificación consta de tres etapas básicas: el secado, la pirólisis y la gasificación.

Las reacciones que en la zona de reducción química se dan en un proceso de gasificación son:

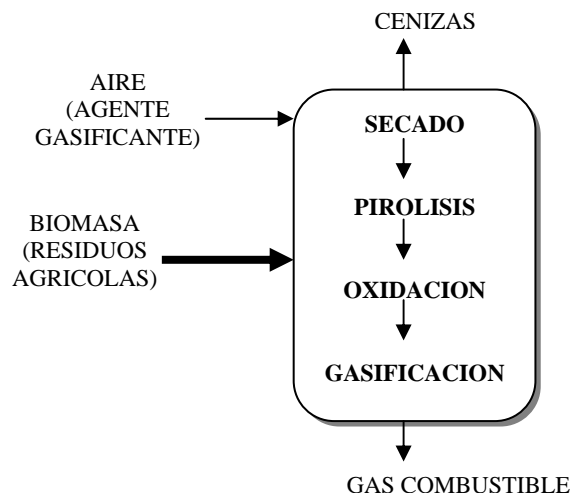
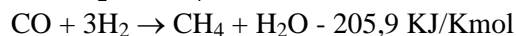
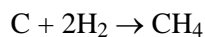
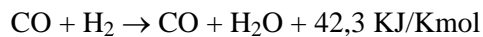
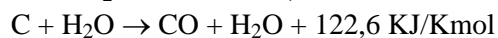
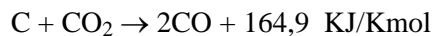


FIGURA4: GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

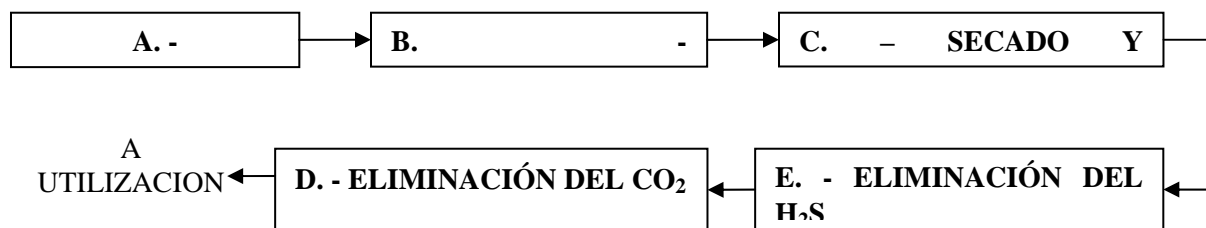


FIGURA 4: TRATAMIENTO DEL GAS DE GASIFICADOR

CALCULOS DE INGENIERIA

CONSUMO DE PETROLEO BUNKER C EN CALDERAS PIROTUBULARES

Ecuación del Balance de Calor: $B \cdot PCI \cdot \eta_c = m_v \cdot (h_v - h_a)$, en la cual:

B = Flujo másico del petróleo Bunker C (Galones USA/h)

PCI = Poder calorífico Inferior del Petróleo Bunker C

Se determina para un valor promedio de los componentes: $g_c = 0.85$, $g_H = 0.1$, $g_s = 0.03$, $g_o = 0.02$

g_c = Participación másica del Carbono

g_H = Participación másica del hidrógeno

g_s = Participación másica del azufre,

g_o = Participación másica del oxígeno.

1) OXÍGENO PARA LA COMBUSTIÓN: $O_m = 8/3g_c + 8g_H + g_s - g_o = 3.07 \text{ kg O}_2 / \text{kg Petróleo}$

2) AIRE TEÓRICO PARA LA COMBUSTIÓN: $L_m = O_2t/0.23 = 3.07/0.23 = 13.37 \text{kg Aire/Kg petróleo}$

3) CANTIDAD REAL DE AIRE PARA LA COMBUSTIÓN:

Por análisis de gases de chimeneas de las calderas, $CO_2 = 12\% \rightarrow$ Coeficiente de exceso de aire $\lambda = 0.196/0.12 = 1.6 \Rightarrow \text{Aire Real} = L_r = \lambda * \text{Aire Teórico} = 1.6 * 13.37 = 21.40 \text{kg Aire / kg Petróleo}$

4) GASES PRODUCIDOS EN LA COMBUSTIÓN: $m_g = 11/3 * g_c + 9g_H + 2g_s + (\lambda - 0.23) * L_m = 11/3 * 0.85 + 9 * 0.1 + 2 * 0.03 + (1.6 - 0.23) * 13.377 = 22.4 \text{ Kg. gases / Kg. petróleo}$

5) PODER CALORÍFICO INFERIOR DEL PETRÓLEO BUNKER C: Se aplica la fórmula de Dulong:

$$PCI = 4.186 * (5100 * g_c + 28000 * (g_H - g_o/8 + 2500 * g_s)) =$$

$$= 4.186 * [8100 * 0.85 + 28000 * (0.1 - 0.02/8) + 2500 * 0.03] = 40562.34 \text{ kJ/kg. Petróleo}$$

Siendo la densidad del petróleo Bunker C: $\rho = 3.664 \text{ Kg./Galón (A.P.I. = 11.80)}$:

PCI del petróleo = $148620.41 \text{ kJ/Galón} = 140,872.430 \text{ Btu/Galón}$

η_c = Rendimiento de combustión del petróleo = 76%

m_v = Flujo másico del vapor de la caldera (Lb/h)

h_v = Entalpía del Vapor Saturado (Btu/Lb)

h_a = entalpía del agua que entra a la caldera (Btu/Lb)

$$\text{Reemplazando: } B = \frac{17500 * (1150 - 180)}{140872.43 * 0.76} = 158.55 \text{ Gal Petróleo / h}$$

CARGA ENERGETICA DE LA PLANTA INDUSTRIAL

1. - CARGA TERMICA EN LAS CALDERAS PIROTUBULARES

- Flujo de vapor saturado: $17500 \text{ lb/h} = 7945 \text{ kg/h}$
- Presión del vapor saturado = 10 bar

- Entalpía vapor saturado: 1150 Btu/Lb = 2664 kJoule/kg.
- Temperatura agua alimentación a la caldera: 80 °C
- Entalpía agua alimentación a la caldera: 180Btu/lb. = 417 kJoule/kg.
- Rendimiento de Combustión : 80%

CARGA TÉRMICA DE LA CALDERA EN SISTEMA NUEVO DE COGENERACION:

El gas a la salida de la turbina, de 500 ° será utilizado en un calentador del agua de alimentación a la caldera, cuya temperatura es actualmente de solamente 30 °C. se proyecta calentar el agua hasta los 200 °C , con lo cual su entalpía alcanzará el valor de $i_a = 798$ kJ/kg, con una presión de $p = 12.5$ atm. Entonces, la carga térmica en condiciones de uso de biogas y sistema de cogeneración de energía:
 Flujo másico de vapor * (Entalpía Total Vapor Saturado – Entalpía Agua de Alimentación)/ Rendimiento de combustión = $7945 \text{ kg/h} * (2664 - 798) \text{ kJ/kg} / 0.85 = 17441611 \text{ kJoule/h} = 4844 \text{ KW} = 4.84 \text{ MW}$

2. - CARGA ELECTRICA DE PLANTA INDUSTRIAL

La carga eléctrica promedio de las Plantas agroindustriales del Area de Chavimochic es 500 kw. Se hará el cálculo con un factor de expansión del orden de 30%.
 Potencia eléctrica activa promedio proyectada: $500 * 1.3 = 650 \text{ KW}$

CÁLCULO DEL CONSUMO EQUIVALENTE DE BIOGAS

1. – CONSUMO EQUIVALENTE DE BIOGAS EN LA CALDERA

PODER CALORÍFICO SUPERIOR DEL BIOGAS: $7.6 \text{ MJoule/Nm}^3 = 7600 \text{ kJoule/Nm}^3$

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN = 85% (puede alcanzar el 90%)

Flujo volúmico de gas de gasificación necesario para asumir carga térmica de caldera:

$$17441611/7600 \text{ [(kJoule/h) / (kJoule / Nm}^3\text{)]} = 2295 \text{ Nm}^3\text{/h}$$

PRODUCCIÓN ESPECÍFICA DE BIOGAS CON BIOMASA VEGETAL:

De acuerdo a la literatura [2] los rendimientos de gasificadores de lecho fluidizado alcanzan valores de 60 a 65 %. Para el presente caso se asume 62.5 %

Del balance del gasificador: Rendimiento = $\text{PCI biogas} * [\text{m}^3 \text{ Biogas/kg Biomasa}] / \text{PCI Biomasa}$

PCI Biomasa = Poder Calorífico Inferior de la Biomasa = 13700 kJ/kg

PCI Biogas = Poder Calorífico Inferior del Biogas = 7600 KJ/Nm³

Despejando: $\text{m}^3 \text{ Biogas/kg Biomasa} = 0.625 * 13700 / 7600 = 1126 \text{ m}^3 \text{ Biogas /kg Biomasa}$

Densidad del Biogas = 0.68 kg/m³

FLUJO MÁSIICO DEL GAS DE GASIFICACIÓN:

Flujo volúmico * Densidad del Biogas = $2295 * 0.68 = 1560.6 \text{ kg Biogas /h}$

En 22 horas al día de operación de la Planta: $= 1560.6 * 22 = 34333.2 \text{ kg/día} = 34.34 \text{ TM Biogas /día}$

Considerando 220 días por año de operación: $34.34 * 220 = 7554 \text{ TM Biogas /año}$

2. – CONSUMO DE BIOGAS EN LA TURBINA A GAS

De acuerdo a la tecnología de cogeneración BID/CC se usará una turbina a gas:

TEMPERATURAS DEL BIOGAS EN LA TURBINA

Temperatura del Biogas a la entrada de Turbina: 800 °C = 1073 °K

Temperatura del Biogas a la salida de la Turbina: 500 °C = 773 °K

RENDIMIENTOS EN LA TURBINA

Rendimiento térmico: $\eta = (1 - T_2 / T_1) * 100 [\%] = (1 - 773/1073) * 100 = 27.95 \%$

Rendimiento Mecánico = 0.97

Rendimiento del generador eléctrico = 0.98

Rendimiento Total = $0.2795 * 0.97 * 0.98 = 0.2657$

CARGA DE LA TURBINA:

Potencia eléctrica proyectada = 650 KW

Poder Calorífico del Biogas = $7600 \text{ kJoule} / \text{Nm}^3 = 5168 \text{ kJoule/kg}$

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE BIOGAS DE LA TURBINA:

Flujo másico de Biogas * Rendimiento total * Poder Calorífico del Biogas = Potencia eléctrica proyectada
 $B = 650 / (0.2657 * 5076.8) = 0.48 \text{ kg Biogas} / \text{s} = 1734 \text{ kg Biogas} / \text{h} = 38.16 \text{ TM Biogas} / \text{día}$

BIOMASA PARA ASUMIR CARGA TÉRMICA Y ELÉCTRICA EN PLANTA:

Biogas para Carga Térmica (en Caldera Pirotubular) = 34.340 TM Biogas /día

Biogas para Carga Eléctrica (en Turbina a gas) = 38.160 TM Biogas /día

Total Biogas para asumir carga energética de la Planta = $72.500 \text{ TM Biogas} / \text{día} = 65647 \text{ m}^3 / \text{día}$

BIOMASA PARA ASUMIR CARGA ENERGÉTICA TOTAL EN PLANTA INDUSTRIAL:

Flujo Volúmico Total de Biogas / Producción específica de Biogas de la Biomasa =
 $65647 \text{ m}^3 \text{ Biogas} / \text{día} / 1126 \text{ m}^3 \text{ Biogas} / \text{TM Biomasa} = 58.30 \text{ TM Biomasa} / \text{día}$

INDICADORES DE PROCESO:

1. – Consumo específico de Biomasa para generar KW térmico = 0.3164 TM Biogas / MW térmico
2. – Consumo específico de Biomasa para generar Kw eléctrico = 0.75 TM Biogas / MW eléctrico

ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN Y USO DE LA BIOMASA

Con el Protocolo de Kyoto, se acordó reducir las emisiones que aumentan el efecto invernadero, entre 5 y 8 % para el 2012, en relación a los niveles de 1990, estableciéndose la necesidad de obtener energías «limpias», que viabilicen el desarrollo energético y asegurar el desarrollo sostenible de la humanidad.

Los gases principales que contribuyen al efecto invernadero son el CO₂, NO_x; el vapor de agua y las emisiones de SO₂, que producen las lluvias ácidas, con impacto negativo en los bosques.

El CO₂ se produce al quemar combustibles fósiles. Carbón, petróleo y el gas natural. Fueron fijados y retirados de la atmósfera por las plantas por millones de años, y ahora son liberados de nuevamente.

La energía de la biomasa es la única que, en su ciclo completo, no contribuye a la emisión de CO₂. Por lo expuesto, es fundamental cultivar biomasa para que absorba el CO₂ de la atmósfera y lo vuelve a liberar una vez quemado. Para la FAO, una de las cosas importantes de la energía de biomasa es que genera empleos. Se crea infraestructura rural. Potencial para rehabilitar tierras degradadas.

EFFECTOS MEDIOAMBIENTALES POSITIVOS DE LA BIOMASA

1. – POR PRODUCCIÓN DE BIOMASA:

Se origina oxígeno en la fotosíntesis, regula la evaporación de agua del suelo, sirve para controlar eficazmente el efecto invernadero

2. – POR UTILIZACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES:

Evita casi totalmente la emisión de SO₂ a la atmósfera, reduciendo la formación de lluvias ácidas, no contribuye a incrementar el efecto invernadero, reducción de porcentaje de combustible inquemado en caldera, adverso Incremento en N₂O.

La Comisión europea <http://www.europa.eu.int> preparó el "Libro Blanco sobre Energías Alternativas". En él se enumeran las llamadas Energías Alternativas que deberán aportar el 10% del total de energía producida en la Comunidad el año 2010.

TABLA 2: EMISIONES DE GAS CARBONICO A LA ATMOSFERA

País	%
Alemania	4
Europa sin Alemania	16
Asia y Oceanía	28
África	3
América del Sur	5
América del Norte	27
Oriente medio	3
GUN	14
Total emisiones CO ₂ : 22295 millones TM CO ₂	Año: 1993
Fuente: Ministerio Energía Alemania	

RIESGOS DEL EMPLEO DE GAS OBTENIDO A PARTIR DE BIOMASA

1. - RIESGOS POR GASES TOXICOS: El biogas contiene CO, muy tóxico, se combina con la hemoglobina de la sangre, evita la absorción y distribución de O₂.

2. - RIESGOS DE INCENDIO: Por elevada temperatura exterior del equipo, por posibilidad de aparición de chispas al recargar el combustible, por existir llamas en la entrada de aire del gasificador o en la etapa de recarga

3. - RIESGOS DE EXPLOSION: Por adición descontrolada de aire al combustible que produce una mezcla explosiva:

4. - RIESGOS AMBIENTALES: Como residuos de la gasificación de biomasa se producen cenizas y líquido condensado, el líquido condensado puede estar contaminado por resinas fenólicas y alquitrán, las

cenizas pueden eliminarse por diferentes métodos en forma normal, por lo cual no es considerado o grave problema ambiental.

EVALUACION ECONOMICA DE LA ENERGIA DEL BIOGAS.

INTRODUCCIÓN:

La tecnología del biogas presenta características que hacen más complejo su análisis económico pues no sólo interviene el aspecto energético sino que también existe un importante impacto de difícil evaluación en sanidad, fertilización, mejoramiento de suelos y mejoramiento de las condiciones de vida.

COSTOS DE OPERACIÓN: Diseño e Instalación, materiales, mantenimiento, mano de obra

COSTOS DE MATERIA PRIMA: Mano de obra, equipo para transporte, materia prima, si se compra

COSTOS DEL EMPLEO DEL EFLUENTE: Mano de obra, equipo para transporte, almacenamiento, transporte al lugar de uso

COSTOS DE UTILIZACION DEL BIOGAS: Almacenamiento, distribución, adaptación de Equipos, purificación

DETERMINANTES SOCIO-ECONOMICOS DEL USO DE BIOGAS

1. - INSUMOS CON BAJO COSTO DE OPORTUNIDAD

- * Producción intensiva de la materia prima, con factibilidad de manipulación y transporte de la misma.
- * Tradición, costumbre o metodología de recolección de los residuos vegetales.
- * Disponibilidad de mano de obra con capacidad y voluntad para la operación de los gasificadores.

2. - LA EFICIENCIA DEL SISTEMA SEA ADECUADA

- * Seguridad de suministro constante en tipo y calidad de biomasa.
- * Disponer de asistencia técnica para el diseño, puesta en marcha y mantenimiento del gasificador.
- * Temperatura ambiente no sea baja, para no usar sistemas de calefacción y aislamiento a mayor costo.

3. - LOS PRODUCTOS GENERADOS TENGAN UN ALTO COSTO DE OPORTUNIDAD

- * Existirá a futuro corto una limitante al libre acceso a los combustibles tradicionales.
- * Los tratamientos de desechos se realizan a altos costos.
- * El costo de manipulación de las materias primas y el efluente es bajo y competitivo.

TABLA 3: EVALUACION ECONOMICA - FINANCIERA PROYECTO BIOGAS PARA COGENERACION CON TECNOLOGIA BIG / CC CON BIOMASA VEGETAL

		0	1	2	3	4	5	15
INVERSION EQUIPOS	USA\$	(700,000)	-	-	-	-	-	-
Costo Instalación	USA\$	(100,000)						
Costo Operación	USA\$/Año		(90,000)	(90,000)	(90,000)	(90,000)	...	(90,000)
Costo Mantenimiento	USA\$/Año		(100,000)	(100,000)	(100,000)	(100,000)	...	(100,000)
COSTO TOTAL	USA\$/Año	-	(190,000)	(190,000)	(190,000)	(190,000)	...	(190,000)
BENEFICIOS								
Ahorro en Petróleo	USA\$/Año		718,740	718,740	718,740	718,740	...	718,740
Ahorro en EE	USA\$/Año		119,194	119,194	119,194	119,194	...	119,194
BENEFICIO TOTAL	USA\$/Año	-	837,934	837,934	837,934	837,934	...	837,934
VALOR RESIDUAL	USA\$/Año		-	-	-	-	...	60,000
FLUJO DE FONDOS	USA\$/Año	(800,000)	647,934	647,934	647,934	647,934	...	707,934
CALCULO DEL: VAN, TIR, B/C y VAE								
	VAN	TIR	B/C	VAE	Ko			
	1,061,077	80.98%	2.33	54,803	20%			
CALCULO EL PRI ó PRC								
			VAN (20%)	Acumulados	VA(Io)	VA(Bn)	N	
	0	(800,000)	(800,000)	(800,000)	800,000	1,861,077	15	
	1	647,934	539,945	(260,055)	PRC ó PRI			
	2	647,934	449,954	189,899				6.45
	3	647,934	374,962	564,861	(VA(Io))/(VA(Bn)/N)			
	4	647,934	312,468	877,329				6.45
	5	647,934	260,390	1,137,719				
	6	647,934	216,992	1,354,711				
	7	647,934	180,826	1,535,538				
	8	647,934	150,689	1,686,226				
	9	647,934	125,574	1,811,800				
	10	647,934	104,645	1,916,445				
	11	647,934	87,204	2,003,649				
	12	647,934	72,670	2,076,320				
	13	647,934	60,558	2,136,878				
	14	647,934	50,465	2,187,343				
	15	707,934	45,949	2,233,292				

TABLA 4: COSTOS ENERGÉTICOS ORIENTATIVOS

Energético	Poder calorífico Superior	Costo Bruto (\$/MJ)	Eficiencia Típica (%)
Carbón	25.5 MJ/kg	1.38	60
Biogas	5.7 MJ/Nm ³	3.5	85
Fuel Oil	158.0 MJ/galón	7.27	80
Gas Natural	39.5 MJ/Nm ³	9.63	85
Pet. Diesel 2	145.4 MJ/galón	14.04	82
En. Eléctrica	3.6 MJ/kWh	31.9	100

CONCLUSIONES

1. Es factible la implementación de la tecnología BIG / CC en plantas agroindustriales del proyecto Chavimochic La Libertad – Perú, pues la demanda de biomasa para asumir la carga energética puede ser cubierta por la biomasa vegetal formada luego de la cosecha diaria. Las Plantas tienen capacidades de 150 a 200 TM / día de productos agroindustriales para exportación
2. Es factible generar empleo en recolección de Biomasa, del orden de 80 a 90 personas por Planta.
3. Respecto a los combustibles fósiles, los biocombustibles son neutros en CO₂ y son renovables.
4. Es factible la cogeneración comercial de energía eléctrica a la red nacional del orden de 200 kw.
5. Las calderas de vapor saturado de las Plantas Industriales pueden trabajar con gas de gasificador
6. La biomasa de residuos vegetales puede generar biogas en gasificador de lecho fluidizado
7. El diseño del gasificador es crítico, fundamentalmente para obtener alta eficiencia (>65%)

RECOMENDACIONES

1. Realizar proyectos estudios sobre cultivos energéticos de corta rotación como el eucalipto, destinando una parte de su area total disponible o adquiriendo para tal fin el área correspondiente.
2. Capacitar fuertemente al personal de operación por los riesgos tóxicos.
3. Realizar pruebas iniciales entre universidad y Empresa Agroindustrial
4. Sensibilizar el análisis financiero
5. Adquirir la tecnología BIG / CC disponible comercialmente y cuya operación sea la menos compleja posible
6. Analizar la conveniencia de utilizar gas pobre en caldera pirotubular (gasificación con aire) y gas de síntesis en turbina a gas (gasificación con oxígeno), para aumentar los rendimientos energéticos y reducir la demanda de biomasa a ser transformada.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Armas, C de. ; González, L. : "La caña de azúcar como fuente de energía", La Industria de los Derivados de la Caña de Azúcar, pp :57-89, Editorial Científico-Técnica, 1986
- [2] Combustibles para el futuro, Reseña de W. Driscoll, Facetas, #130, pp :76-78, ene/94
- [3] Llanes, J.; Torres, J.: "Caña de azúcar, ¿azúcar o energía? Hacia un sistema energético sustentable", Taller Económico ambiental, Kingston, Jamaica, 1994
- [4] Sears, F.W.: "Termodinámica", Ed. Reverté, 1973
- [5] Singer, J.G.: "Combustion Fossil Power Analysis", Combustion engineering, INC., 1981

PÁGINAS WEB:

<http://bioproducts-bioenergy.gov/pdfs/bcota/abstracts/11/34.pdf>

<http://www.ieiglobal.org/ESDVol5No1/BIGGTinsugarcane.pdf>

“El gas de madera como combustible para motores” www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s00.htm#Contents

<http://www.epa.gov/appcdwww/apb/biomass.htm>

http://www.eere.energy.gov/biomass/large_scale_gasification.html

Biographic Information

Ing. Marcos Baca López. Marcos Baca es Ingeniero Industrial, Master en Ingeniería Industrial con Mención en Gerencia de Operaciones, profesor del curso de Investigación de Operaciones en la Universidad Privada del Norte y en la Universidad Nacional de Trujillo. Es el Director de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad Privada del Norte. Miembro del Colegio de Ingenieros del Perú..

Ing. Raúl Paredes Rosario. Raúl Paredes es Ingeniero Mecánico, Master en Ingeniería Industrial con Mención en Gerencia de Operaciones, profesor del curso de Termodinámica y Automatización en la Universidad Privada del Norte. Gerente de la empresa Termoautomática EIRL. Miembro del Colegio de Ingenieros del Perú.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the papers in the conference proceedings on CD and on the web. Neither LACCEI nor the editors will be responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.