

# Estudio termodinámico y dimensionamiento de un gasificador downdraft para un sistema de cogeneración compacto en comunidades aisladas

## THERMODYNAMIC STUDY AND DOWNDRAFT GASIFIER DIMENSIONING FOR COGENERATION COMPACT SYSTEM IN ISOLATED LOCALITIES

---

Nestor Proenza Pérez  
Ramon Cala Aiello  
Departamento de Mecánica, facultad de Electromecánica  
Universidad de Camagüey, Cuba.  
Jose Luz Silveira  
Departamento de Energía, UNESP  
Rolando Zanzi  
Departamento de Ingeniería de Reacciones Químicas

### RESUMEN

Los sistemas de gasificación se vienen usando hace muchos años. Ellos han demostrado ser una buena alternativa para resolver los problemas energéticos en comunidades aisladas del sistema electroenergético. En este trabajo se estudia un sistema de gasificación asociado a un motor de combustión interna. El diseño de este sistema se consideraron tanto los aspectos técnicos como económicos para la aplicación en comunidades rurales aisladas donde el suministro eléctrico no es económicamente viable desde el punto de vista social. Al mismo tiempo fueron determinados las contribuciones y beneficios económicos y sociales que traería la implantación de esta tecnología.

### PALABRAS CLAVES

Termodinámica. Biomasa. Gasificador. Downdraft.

### ABSTRACT

The gasification system has been used for many years ago. It has demonstrated a good way for to solve energetic problems for isolated communities. In this paper, is studied the gasification system associated to internal combustion engine. Are considered technical and economical aspects for the system design for applications in rural localities where the electricity energy is not possible since economical and social viewpoint. In this manner social contribution and economical benefits can be determinated.

### KEYWORDS

Thermodynamics. Biomass. Gasifier. Downdraft.

### INTRODUCCIÓN

Después de la doble crisis de los combustibles, de 1973 y 1979, se ha puesto en evidencia el efecto nocivo de los elevados costes, en continuo aumento, de los precios del petróleo, para la economía y los esfuerzos de progresos de los países en desarrollo importadores de petróleo. Como resultado de ella, se ha producido un aumento del interés por las fuentes nacionales de energías renovables, de las cuales, la biomasa, en forma de madera o de residuos agrícolas, es el más fácilmente disponible en muchos países en desarrollo.

Las investigaciones sobre la tecnología de las instalaciones gasificador/motor, han servido para conseguir unos diseños modernos que funcionan con seguridad, en un nivel de capacidad técnica apropiado para aplicaciones rurales en países en desarrollo. Tales sistemas son económicos en ciertas condiciones, que se dan en muchos países en desarrollo, pero la tecnología y los medios de fabricación no están generalmente disponibles y su utilización comercial es limitada.

### DESARROLLO

#### SELECCIÓN DEL COMBUSTIBLE

El término biomasa engloba las materias forestales generadas a través de la fotosíntesis y de sus deriva-

dos, tales como: residuos forestales y agrícolas, residuos animales y la materia orgánica contenida en los residuos industriales, domésticos y municipales, etc.

En nuestro caso hemos escogido como fuente de

alimentación para el gasificador a los biocombustibles de madera, específicamente a las especies de Eucaliptos pellita, saligna y citriodora por su amplia cobertura en todo el territorio de Brasil y su ciclo relativamente rápido de reposición.

Tabla 3: Composición elemental en base trabajo para distintas humedades tomando como referencia la composición en base seca que brindan (Horta N Silva Lora, 2003).

Humedad (%)	30	25	20	15	10
C <sup>1</sup>	34,3	36,75	39,2	41,65	44,1
H <sup>1</sup>	4,11	4,40	4,69	4,99	5,28
O <sup>1</sup>	30,78	32,98	35,18	37,27	39,57
N <sup>1</sup>	0,21	0,23	0,24	0,25	0,27
S <sup>1</sup>	0,007	0,0075	0,008	0,0085	0,009
A <sup>1</sup>	0,504	0,540	0,576	0,612	0,648
PCB <sup>2</sup> (kJ/kg) <sup>1</sup>	11755,822	12774,095	13792,368	14810,641	15828,914

<sup>1</sup> estos valores están dentro del rango que da (Horta N Silva Lora, 2003).

## SELECCIÓN DEL TIPO DE GASIFICADOR

Después de una amplia revisión bibliográfica y de estudiar las ventajas y desventajas de los distintos tipos de gasificadores existentes en el mercado decidimos para la realización de este trabajo escoger un gasificador Downdraflth de tiro invertido; Imbert o concorrente como queríamos que se llamarai porque el mismo responde a las necesidades planteadas por nosotros.

## GASIFICADOR DE LECHO FIJO Y FLUJO DESCENDENTE

Se trata de gasificadores de lecho fijo en equicorrientes. El gas y el sólido fluyen a través del lecho, sostenido de una disminución del diámetro denominado "garganta", a la altura del cual viene introducido el agente oxidante (generalmente aire). En la zona en torno a la garganta se alcanza la temperatura más elevada (alrededor de los 1000 °C). Sobre esta zona ocurre el cracking del tar producto de las reacciones de pirólisis. Las reacciones de cracking del tar continúan debajo de la garganta en el lecho de carbón. Esta configuración determina una alta conversión de los productos intermedios de la pirólisis y por tanto un gas relativamente limpio.

Se ha encontrado una solución al problema del arrastre de alquitrán con la corriente de gas, diseñando gasificadores de tiro invertido o corriente descenden-

te, en los cuales el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación del gasificador o por encima de ésta. El gas pobre sale por el fondo del aparato de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

La principal ventaja de los gasificadores de tipo invertido radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores.

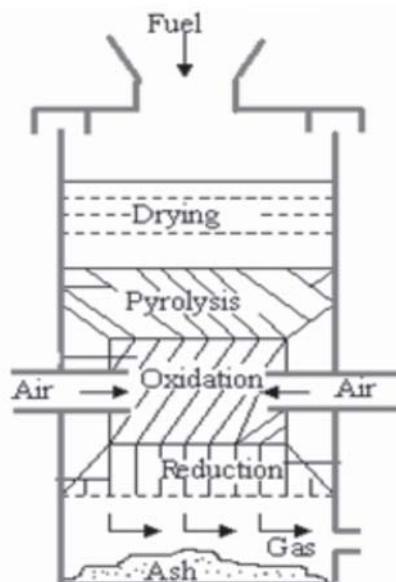


Figura 1: Gasificador de lecho fijo con flujo descendente

Tabla 4: Características técnicas

Combustible	Madera de eucalyptus
Contenido de humedad	10 -30 %
Contenido de cenizas	0, 5 -0, 7 %
Densidad aparente	450 - 600 kg / m <sup>3</sup>
Gasificador	Downdraft concurrente
Agente gasificante	Aire
Tratamiento del gas	Enfriamiento, ciclón y filtro de arena
Eficiencia del gasificador	70 %
Consumo específico de madera	1,952 kg / KWh
Tipo de gasificador	F <sub>3</sub>
Consumo mínimo de madera	5,118 kg / h
Consumo máximo de madera	9,76 kg / h
Producción de gas de madera	5.575 m <sup>3</sup> / kg
Dimensiones de las astillas	1 x 0,5 x 0,5 cm - 4 x 4 x 5 cm
Poder calórico bajo del gas	4,979 MJ/Nm <sup>3</sup> <sup>2</sup>
Contenido de alquitrán	0,04 – 0,02 g/m <sup>3</sup> <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Valor muy aproximado a los que brinda la bibliografía (Horta N Silva Lora, 2003) para el caso de la utilización en motores se pide que este contenido sea menor de 50 mg/Nm<sup>3</sup>

## 2.3 SELECCIÓN DEL MCI

La selección del motor se tiene que considerar con mucho cuidado porque la gama de eficiencia es muy grande. Muchos factores se tienen que tener en cuenta. Ante todo, hay tres categorías principales de motores que se podrían utilizar posiblemente: motores de ciclo Otto que trabajan con gasolina, motores que trabajan con queroseno , motores de diesel. Utilizando un motor con diesel como combustible, el problema que se nos presentará es la aparición de detonaciones por lo que el motor necesita una mezcla de 10% de diesel y 90% de gas pobre de madera para

funcionar sin problemas.

Los motores que trabajan con gasolina son mucho más fáciles de transformarse al uso de gas pobre de madera porque su conducta química es más semejante. En este trabajo se estudio una amplia gama de motores diferentes con potencias entre 3-6 kW los cuales fueron evaluados y finalmente decidimos para nuestro estudio un Motogenerador Honda ep 5500.

Tabla 1: Listado de motores estudiados.

Fabricante	Modelo	Cap Taq. (l)	Ep (kW)	Temp. gases salida[°C]	Comb empleado	Consumo de combustible
Agrale	M73		3.8	4.4	450 Gasolina	310 g/kW.h
Honda	GXH50			1.76	450 Gasolina	310 g/kW.h
Honda	GX120		2.64	2.82	450 Gasolina	310 g/kW.h
Honda	GX200		3.8	4.576	450 Gasolina	255 g/kW.h
Yanmar	L40AE-S		2.7	3.1	450 Diesel	275 g/kW.h
Yanmar	L48AE-S		2.86	3.5	450 Diesel	270 g/kW.h
Yanmar	L60AE-S		3.7	4.5	450 Diesel	255 g/kW.h
Yanmar	L70AE-S		4	5.2	450 Diesel	260 g/kW.h
Yanmar	NSB50		6.5	3.3	450 Diesel	280 g/kW.h
Yanmar	NSB75		9	4.4	450 Diesel	260 g/kW.h
Yanmar	NSB11		10.5	6.9	450 Diesel	260 g/kW.h
<b>Honda</b>	<b>GX 340</b>		<b>17</b>	<b>5</b>	<b>450 Gasolina</b>	<b>474 g/kW.h</b>
	<b>ep5500</b>					

Tabla 2 : Algunas Características del motor.

tipo - opcionales	LD - A1
potencia nominal (w)	5000
potencia máxima (w)	5500
voltaje C A (volts)	120 e 240
voltaje CC (V) / corriente (A)	12V / 8,3A
modelo do motor	GX340
tipo do motor	OHV, 4 tempos, monocilíndrico, refrigerado a aire
potencia (CV)	11,0 CV
cilindrada (cm³)	337 cm³
capacidad del tanque (L)	17,0 L
consumo (L / h)	3,20 L / h
autonomía (h)	5,3 h
sistema de partida	manual retrátil y eléctrica
nivel de ruido a 7m (db)	72 db
dimensiones (c x l x a) (mm)	830 x 510 x 490
peso líquido (Kg)	82,5 Kg

## CÁLCULOS TEÓRICOS

Cálculo del poder calórico bajo de la madera de eucalipto (PCBb).

Para la determinación del PCBb de la madera de Eucalipto se utilizó la siguiente ecuación.

$$PCB_b = 339 * C^t + 1030 * H^t - 109 * (O^t - S^t) - 25 * W^t \quad (1)$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 1.

De aquí se determinó la Composición aproximada de los gases de madera utilizando un gasificador atmosférico y aire como agente de gasificación, según (Horta N, y Silva Lora, 2003).

$N_2 = 52\%$ ,  $CO = 16,3\%$ ,  $CO_2 = 13,5\%$ ,  $H_2 = 12,5\%$ ,  $CH_4 = 4,4\%$ ,  $HC = 1,2\%$

Con esta composición se determinó el PCBg.

$$PCB_g = 0,116 * CO + 0,358 * CH_4 \quad (2)$$

$$+ 0,108 * H_2 + 0,59 * C_2H_4 + 0,637 * C_2H_6$$

$$PCB_g = 4,979 \quad \text{MJ/Nm}^3$$

$$PCB_g = 4286,63 \quad \text{kJ/Kg}$$

Tabla 4: Poderes calóricos inferiores.

	Gasolina	Biomasa	Gas pobre
PCB (Kj/Kg)	48 412,22	11 755,822	4286,63
$\rho$ (Kg/m³)	0,72 - 0,76	550	1,234
PM(kj/Nm³)	-	-	1,162

<sup>†</sup> Peso Molecular del gas.

Consumo de madera necesario para igualar el poder calórico de la masa de gasolina.

Consumo de gasolina = 2,37 Kg/h

Energía obtenida = PCBg \* Consumo de gasolina

Energía obtenida = 114 736,96 kJ/h

Consumo de madera = energía obtenida / PCBb

Consumo de madera = 9,76 Kg/h Cantidad de madera necesaria para igualar la misma cantidad de energía que desprende la masa total de gasolina.

Consumo de madera = 5.118 Kg/kg Cantidad de madera necesaria para igualar la energía producida por 1 Kg de gasolina.

Tabla 5 : Determinación de algunos parámetros termodinámicos.

Humedad %	30	25	20	15	10	Unidad
Va <sup>o</sup>	3,113	3,336	3,558	3,781	4,003	m <sup>3</sup> / kg
Va <sup>v<sub>a</sub></sup>	3,339	3,641	3,884	4,127	4,370	m <sup>3</sup> / Kg
ma <sup>o</sup>	3,616	3,874	4,133	4,391	4,649	kg
ma <sup>v<sub>r</sub></sup>	3,947	4,229	4,511	4,793	5,075	kg
Va	4,047	4,337	4,626	4,915	5,204	m <sup>3</sup> / kg
Va <sub>r</sub>	4,418	4,734	5,049	5,365	5,68	m <sup>3</sup> / kg
ma	4,701	5,037	5,372	5,708	6,044	kg
ma <sub>r</sub>	5,131	5,498	5,864	6,231	6,597	kg
V <sup>o</sup> <sub>RO2</sub>	0,643	0,689	0,734	0,78	0,826	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>RO2r</sub>	0,702	0,752	0,802	0,852	0,902	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>H2O</sub>	0,878	0,852	0,827	0,801	0,775	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>H2Or</sub>	0,959	0,93	0,902	0,874	0,846	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>N2</sub>	2,461	2,637	2,813	2,989	3,165	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>N2r</sub>	2,687	2,879	3,071	3,262	3,454	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>O2</sub>	0,187	0,2	0,213	0,227	0,24	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>O2r</sub>	0,204	0,218	0,233	0,248	0,262	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>gs</sub>	4,194	4,493	4,793	5,092	5,392	m <sup>3</sup> / kg
V <sup>o</sup> <sub>gsr</sub>	4,578	4,905	5,232	5,559	5,886	m <sup>3</sup> / kg
m <sup>o</sup> <sub>gs</sub>	5,175	5,545	5,914	6,284	6,654	m <sup>3</sup> / kg
m <sup>o</sup> <sub>gsr</sub>	5,649	6,052	6,456	6,859	7,263	m <sup>3</sup> / kg
V <sub>H2O</sub>	0,914	0,891	0,867	0,844	0,821	m <sup>3</sup> / kg
V <sub>H2Or</sub>	0,959	0,93	0,902	0,874	0,846	m <sup>3</sup> / kg
V <sub>gs</sub>	5,108	5,384	5,660	5,936	6,213	m <sup>3</sup> / kg
V <sub>gsr</sub>	5,575	5,877	6,178	6,480	6,781	m <sup>3</sup> / kg
m <sub>gs</sub>	6,303	6,644	6,984	7,325	7,666	kg
m <sub>gsr</sub>	6,88	7,252	7,624	7,996	8,368	kg
V <sub>gr</sub>	5,618	5,922	6,226	6,530	6,834	m <sup>3</sup> / kg
V <sub>grf</sub>	6,133	6,464	6,796	7,128	7,460	m <sup>3</sup> / kg
m <sub>gr</sub>	6,933	7,308	7,683	8,058	8,433	kg
m <sub>grf</sub>	7,568	7,977	8,386	8,796	9,205	kg
V <sub>Iq</sub>	9,155	9,720	10,286	10,851	11,416	m <sup>3</sup> / kg
V <sub>Iqf</sub>	9,993	10,611	11,228	11,845	12,462	m <sup>3</sup> / kg
m <sub>Iq</sub>	11,297	11,995	12,693	13,390	14,088	kg
m <sub>Iqf</sub>	12,332	13,093	13,855	14,616	15,378	kg
V <sub>Igr</sub>	9,666	10,259	10,852	11,445	12,038	m <sup>3</sup> / kg
V <sub>Igrf</sub>	10,036	10,656	11,275	11,895	12,514	m <sup>3</sup> / kg
m <sub>Igr</sub>	11,928	12,659	13,391	14,123	14,855	kg
m <sub>Igrf</sub>	12,385	13,149	13,914	14,678	15,443	kg
r <sub>H2O</sub>	0,172	0,158	0,146	0,135	0,125	
r <sub>RO2</sub>	0,126	0,128	0,130	0,131	0,133	
r <sub>gases</sub>	0,298	0,286	0,276	0,266	0,258	
r <sub>H2Or</sub>	0,189	0,174	0,161	0,148	0,137	
r <sub>RO2r</sub>	0,138	0,141	0,143	0,145	0,146	
r <sub>gasesr</sub>	0,328	0,315	0,303	0,293	0,284	
I <sup>o</sup> <sub>g</sub>	4959,26	5195,30	5431,34	5667,39	5903,43	kJ/kg
I <sup>o</sup> <sub>a</sub>	4361,00	4672,50	4984,00	5295,50	5607,00	kJ/kg
I <sub>g</sub>	6703,66	7064,30	7424,95	7785,59	8146,23	kJ/kg
I <sub>cen</sub>	4,716	5,053	5,390	5,727	6,064	kJ/kg
I	6708,38	7069,36	7430,34	7791,32	8152,30	kJ/kg
I <sub>r</sub>	7379,21	7776,29	8173,73	8570,45	8967,53	kJ/kg
Cons biom	9,76	8,98	8,32	7,75	7,25	Kg/h
Cons biom	5,118	3,79	3,51	3,27	3,06	kgm/kggas
Q <sub>dis</sub>	11922,19	12950,02	13977,86	15005,69	16033,53	kJ/kg
T <sup>o</sup> <sub>c</sub>	1403	1450	1470	1478	1490	° C
T <sub>RC 20%</sub>	1122,4	1160	1176	1182,4	1192	° C
T <sub>RC 25%</sub>	1052,25	1087,5	1102,5	1108,5	1117,5	° C

<sup>4</sup> Todos los parámetros que tienen subíndice (F) están referidos a presión atmosférica y temperatura 25 grados Celsius los demás están referidos a presión atmosférica y temperatura 0 grados Celsius.

$$F = \frac{273 - Temp}{273}$$

$$F = 1,092$$

donde:

$V_a^o$	Volumen de aire teórico	$m_{Tg}$	Masa real Total de gases con recirculación.
$ma^o$	Masa de aire teórico	$r_{H_2O}$	Fracción Volumétrica de vapor de agua
$V_a$	Volumen de aire real	$r_{RO_2}$	Fracción Volumétrica de $RO_2$
$ma$	Masa de aire real	$r_{gases}$	Fracción Volumétrica Total de los gases
$V_{RO_2}^o$	Volumen teórico de $RO_2$	$r_{H_2O_r}$	Fracción Volumétrica de vapor de agua con R.
$V_{H_2O}^o$	Volumen teórico de $H_2O$	$r_{RO_2_r}$	Fracción Volumétrica de $RO_2$ con recirculación
$V_{N_2}^o$	Volumen teórico de $N_2$	$r_{gases_r}$	Fracción Volumétrica Total de los gases con R
$V_{O_2}^o$	Volumen teórico de $O_2$	$I_a^o$	Entalpía Teórica de los gases de comb.
$V_{gs}^o$	Volumen Teórico de gases secos	$I_a$	Entalpía Teórica del aire.
$m_{gs}^o$	Masa Teórica de gases secos	$I_g$	Entalpía de los gases de comb.
$V_{H_2O}$	Volumen real de $H_2O$	$I_{cen}$	Entalpía de las cenizas.
$V_{gs}$	Volumen real de gases secos	$I$	Entalpía total de los productos de comb.
$m_{gs}$	Masa real de gases secos	$I_r$	Entalpía total de los productos de comb. con R
$V_{gsr}$	Vol real de gases secos con recirculación .	Cons biom	Consumo de biomasa.
$m_{gsr}$	Masa real de gases secos con recirculación.	$Q_{dis}$	Calor disponible en la cámara de combustión
$V_{Tg}$	Volumen real Total de gases.	$T_c$	Temp. teórica de combustión
$m_{Tg}$	Masa real Total de gases.	$T_{rc\ 20\%}$	Temp real de comb. (20% menor que la $T_c$ )
$V_{Tgr}$	Volumen Total de gases con recirculación.	$T_{rc\ 25\%}$	Temp real de comb. (25% menor que la $T_c$ )

Ecuaciones utilizadas para la determinación de cada uno de los parámetros anteriores:

$$V_a^o = 0,0889 * (C^t + 0,375 * S^t) + 0,265 * H^t - 0,0333 * O^t \quad (4)$$

$$V_g^o = V_{RO_2} + V_{N_2} + (\alpha_m - 1) * V_a^o \quad (5)$$

$$I_g^o = V_{RO_2} * i_{RO_2} + V_{H_2O} * i_{H_2O} + V_{N_2} * i_{N_2} \quad (6)$$

$$I_a^o = V_a^o * i_{aire} \quad (7)$$

$$I_g = I_g^o + (\alpha_{II} - 1) * I_a^o \quad (8)$$

$$I_{cen} = 0,01 * A^t * a_{rr} * i_{cen} \quad (9)$$

donde:  $a_{rr} = 0,95$  Tabla 1.4 10

$$I = I_g + I_{cen} \quad (10)$$

$$I_r = (1 + r) * I \quad (11)$$

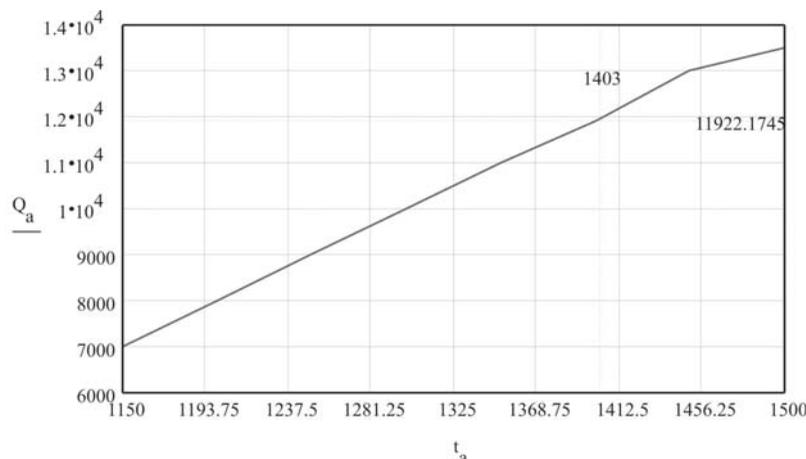


Figura 2: Determinación de la temperatura teórica de combustión por el método de resolución gráfica.

## FÓRMULAS PARA CALCULAR PARÁMETROS DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

<sup>6</sup> donde E es la potencia.

<sup>7</sup> donde  $\eta$  es la eficiencia en dependencia del combustible empleado.

<sup>8</sup> donde m es la masa de cada elemento.

Humedad (%)	30	25	20	15	10	Unidad
$E_{\text{gasolina}}^6$	31,871					kW
$\eta_{\text{gasolina}}$	0,173					
$E_{\text{gasmadera}}$	38,258					kW
$\eta_{\text{gasmadera}}^7$	0,144					
$E_{\text{madera}}$	31,87	34,63	37,39	40,15	42,9	kW
$m_{\text{aire}}^8$	51,6	54,39	57,15	59,92	62,7	kg
$m_{\text{gasMCI}}$	58,48	61,64	64,77	67,91	71,06	kg
$E_{\text{MCI}}$	3,91	4,12	4,33	4,54	4,75	kW
$E_{\text{agua caliente}}$	3,128	3,297	3,464	3,632	3,801	kW
$\eta_{\text{global}}$	0,226	0,23	0,234	0,239	0,243	
$m_{\text{agua}}$	0,077	0,081	0,085	0,089	0,093	m <sup>3</sup> /s

Tabla 3: Variación de algunos parámetros en función de la humedad del combustible inicial (madera de eucaliptos).

R. Compresión	7,5:1	8:1	9:1	10:1	11:1	Unidad
$E_{\text{gasolina}}$	31,871					kW
$\eta_{\text{gasolina}}$	0,173					
$E_{\text{gasmadera}}$	38,258					kW
$\eta_{\text{gasmadera}}$	0,144					
$m_{\text{aire}}$	51,6	55,04	61,92	68,8	75,68	kg
$m_{\text{gasMCI}}$	58,48	61,92	68,8	75,68	82,56	kg
$E_{\text{MCI}}$	3,91	4,14	4,6	5,06	5,52	kW
$E_{\text{agua caliente}}$	3,128	3,312	3,68	4,048	4,416	kW
$\eta_{\text{global}}$	0,226	0,23	0,24	0,25	0,259	
$m_{\text{agua}}$	0,077	0,081	0,09	0,099	0,108	m <sup>3</sup> /s

Tabla 4: Variación de algunos parámetros en función del radio de compresión utilizado en el Motor de combustión interna.

Ecuaciones utilizadas.

$$R_{\text{compresión}} = 7,5 \text{ pero } R_{\text{compresión}} = m_{\text{aire}}/m_{\text{gas}}, \text{ por tanto la } m_{\text{aire}} = R_{\text{compresión}} * \quad (12)$$

$$E_{\text{MCI}} = \frac{m_{\text{gasMCI}} * C_{p\text{gases}} * \Delta T_{\text{gas}}}{3600} \quad (13)$$

$$E_{\text{agua}} = 0,8 * E_{\text{MCI}} \quad (14)$$

$$E_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} * C_{p\text{agua}} * \Delta T_{\text{agua}} \quad (15)$$

### CÁLCULO DE LA POTENCIA DE SALIDA DEL MCI UTILIZANDO GAS POBRE

Para la determinación de estos parámetros se utilizaron las siguientes ecuaciones obteniéndose los siguientes valores:

$$\text{Pot}_{\text{termicagas}} = F_{\text{realgas}} * PCB_{\text{gas}} \quad (16)$$

$$\text{Pot}_{\text{mecanicasal}} = \text{Pot}_{\text{termicagas}} * 0,2^9 \quad (17)$$

<sup>9</sup> 0,2 es la eficiencia aproximada Del motor con un radio de compresión de 7,5:1.

$$\text{Pot}_{\text{electrica}} = \text{Pot}_{\text{mecanicasal}} * 0,8^{10} \quad (18)$$

$$^{10} \cos \phi_{\text{generador}} = 0,8$$

Tabla 5: Flujos y potencias de entrada y salida al MCI.

<sup>11</sup> para la mezcla estequiométrica.

r.p.m	1800	2200	3000	3600	Unidad
Flujo <sub>airegasMCI</sub>	0,00506	0,00618	0,00843	0,01011	m <sup>3</sup> /s
Flujo <sub>gas</sub> <sup>11</sup>	0,00241	0,00294	0,00401	0,00481	m <sup>3</sup> /s
Flujo <sub>realgas</sub>	0,00193	0,00235	0,00321	0,00385	m <sup>3</sup> /s
Pot <sub>termicagas</sub>	9,588	11,791	15,98	19,176	kW
Pot <sub>meccasas</sub>	1,918	2,344	3,196	3,835	kW
Pot <sub>eléctrica</sub>	1,534	1,875	2,557	3,068	kW
η <sub>eléctrica</sub>	30,68				%
η <sub>térmica</sub>	38,36				%
η <sub>Global</sub>	69,04				%

Tabla 6: Potencias de salida según el radio de compresión utilizado en el MCI.

R.compresión	7,5:1	8:1	9:1	10:1	11:1	Unidad
Pot <sub>meccasas</sub> <sup>12</sup>	1,918	2,397	2,685	2,819	3,068	kW
Pot <sub>eléctrica</sub>	1,534	1,918	2,148	2,255	2,455	kW
η(%)	20	25	28	29,4	32	

<sup>12</sup> para 1800 r.p.m

## EVALUACIÓN ECONÓMICA

El análisis de la viabilidad de cualquier planta depende de los costes de la producción de la electricidad que tienen que cubrir los costes totales en lo referente a los sistemas elegidos. En el caso de los sistemas de cogeneración, el análisis de la viabilidad también depende del coste de producción del calor útil para cubrir el coste en una producción convencional del

calor. Los experimentos internacionales demuestran, una tendencia a aumentar las tarifas subvencionadas de electricidad, es por esto que la inversión en sistemas de cogeneración anima a muchos y en algunos casos el período de reembolso obtenido es entre 2.5 - 4 años.

Tabla 7: Valores obtenidos

Modelo	Honda ep 5500	H	2555[Horas/año]
E <sub>p</sub>	5.5 kW	P <sub>el</sub>	0.329 [US\$/kWh]
I <sub>PMG</sub>	1,200 [US\$]	P <sub>elagua</sub>	0.671 [US\$/kWh]
I <sub>g</sub>	1000 [US\$]	C <sub>en</sub>	0.03 [US\$/kWh]
I <sub>TC</sub>	187,68 [US\$]	f	0,0003
PER	30,9 kW	r	12%
C <sub>ManMot</sub>	0,008 [US\$/kWh]	k	2,5 [años]
C <sub>ManTC</sub>	0,003 [US\$/kWh]	C <sub>leña</sub> <sup>13</sup>	0,00612 [US\$/kWh]
C <sub>Manpmg</sub>	0,13 [US\$/kWh]	C <sub>ostilla</sub> <sup>14</sup>	0,00765 [US\$/kWh]
E <sub>comb(gas)</sub>	38.25 kW	C <sub>gas</sub>	0,007414 [US\$/kWh]
E <sub>agua</sub>	3,128 kW	C <sub>electricidad</sub>	0,13007 [US\$/kWh]
E <sub>c</sub>	3,91 kW	C <sub>aguacaliente</sub>	0,00459 [US\$/kWh]

<sup>13</sup> Tomando como referencia que una tonelada de leña cuesta 20 dólares.

<sup>14</sup> Tomando como referencia que una tonelada de leña cuesta 25 dólares.

Con el método de costes de producción de (Silveira, 1994 ) de la electricidad y del agua caliente de un sistema de cogeneración, el mismo puede ser analizado con las ecuaciones siguientes. En estas ecuaciones I

significa el costo de inversión , H el período de utilización del sistema (tiempo de operación), E la energía (eléctrica y calor), C los costes, CM los costes de mantenimiento y f el factor de anualidad.

$$C_{\text{ostogas}} = \frac{I_{\text{gf}}}{H * E_{\text{gas}}} + \frac{C_{\text{ostolena}} * E_{\text{lena}}}{E_{\text{gas}}} + \frac{C_{\text{ostolena}} * E_{\text{lena}}}{E_{\text{gas}}} \quad (19)$$

$$C_{\text{ostoelectr icidad}} = \frac{I_{\text{PMG}} * f}{H * E_{\text{p}}} + \frac{C_{\text{ostogas}} * P_{\text{el}}}{E_{\text{gas}}} + C_{\text{Manpmg}} \quad (20)$$

$$C_{\text{ostoaquacaliente}} = \frac{I_{\text{HE}} * f}{H * E_{\text{agua}}} + C_{\text{ostogas}} * \frac{P_{\text{elagua}}}{E_{\text{agua}}} + C_{\text{ManTC}} \quad (21)$$

Humedad (%)	30	25	20	15	10	Unidad
Costo <sub>gas</sub> <sup>15</sup>	0,007414	0,008061	0,008704	0,009346	0,009987	USD/kWh
Costo <sub>electricidad</sub>	0,13007	0,013007	0,13008	0,13008	0,13009	USD/kWh
Costo <sub>aguacaliente</sub>	0,00459	0,00473	0,00487	0,005	0,00514	USD/kWh
Costo <sub>leña</sub>	0,00612					USD/kWh
Costo <sub>astilla</sub>	0,00765					USD/kWh

Tabla 8: Costos a diferentes porcentos de humedad del combustible.

<sup>15</sup> para r = 12 (interés anual) y k = 2,5 años, 25 [US\$/Ton] de astilla y 20 [US\$/Ton] de leña.

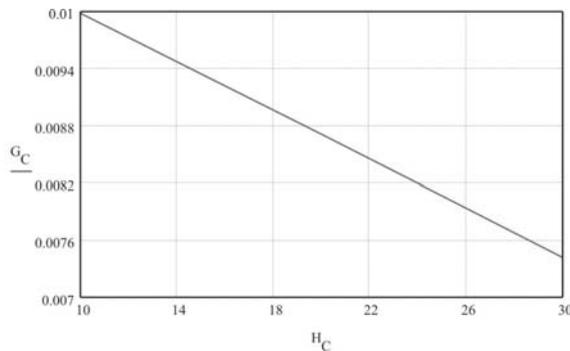


Figura 3: Costo de producción de gas (USD/kWh) vs Humedad del combustible (%).

$$GP_{\text{el}} = E_{\text{p}} * H * (P_{\text{el}} - C_{\text{el}}) \quad (22)$$

$$GP_{\text{agua}} = E_{\text{agua}} * H * C_{\text{aguacaliente}} \quad (23)$$

$$R = GP_{\text{el}} + GP_{\text{agua}} \quad (24)$$

## CONCLUSIONES

Después de un exhaustivo análisis de los resultados teóricos obtenidos podemos concluir lo siguiente:

" La madera de Eucalipto con contenido menor del 30 por ciento de humedad cumple los requisitos para utilizarla en el proceso de gasificación y obtener un gas pobre con un poder calórico entre 3 -6 MJ/ Nm<sup>3</sup> .

" Para el caso de utilización del gas de madera pobre en aplicaciones directas en un motor de combustión interna para la generación de electricidad sin dudas uno de los gasificadores más atractivos para

La ganancia o el ahorro previsto anual se calcula con la suma de los aumentos o de las ganancias que se logran con la instalación del sistema (los aumentos que vienen de la producción de la electricidad y del agua caliente, no incluyendo las ganancias de la venta de electricidad). El aumento de la producción de la electricidad (GP<sub>el</sub>) y la producción de agua caliente (GP<sub>hw</sub>) y el ahorro previsto anual total (r) se calculan con las ecuaciones siguientes.

esta practicó lo constituyen los gasificadores downdraft concurrentes, por todas las ventajas que se pueden lograr con esta tecnología.

" El consumo de madera determinado fue de 9,76 Kg/h de biomasa teniendo un consumo específico de 1, 95 kg/kwh.

" Se utilizó= un radio de compresión de 7,5:1, que es la situación más desfavorable que podemos presentar ya que con radios de compresión más elevados se mejoraría grandemente la eficiencia del sistema, en el trabajo se dan algunos valores utilizando otros radios de compresión más favorables..

" La potencia de salida determinada para 1800 rpm, fue de 1,534 kWh, esas serian las rpm más bajas a

que trabajaría el motor para mayores rpm esta potencia aumentaría sin olvidar que por encima de 2500 rpm tenemos el peligro de que surjan caídas bruscas de la eficiencia producto de que se iguale la velocidad de combustión de la mezcla y la velocidad media del pistón, la solución sería aumentar el radio de compresión para aumentar la potencia de salida, a 1800 rpm.

" Se determino que para un costo aproximado de 20 y 25 dólares por tonelada de leña y de astillas de madera respectivamente el costo de las mismas sería de 0,00612 [US\$/kWh] y 0,00765 [US\$/kWh], obteniéndose que para un gasificador pequeño de aproximadamente 7000 dólares de inversión inicial y que trabaje 7 horas diarias durante todo el año con un interés anual del 12% y un factor de anualidad del 0,0003; el gas producido costaría aproximadamente 0,0074149 [US\$/kWh], el costo de la electricidad sería de 0,13007 [US\$/kWh] aproximadamente, y si existiera cogeneración el costo del agua caliente sería de 0,00459 [US\$/kWh].

" Se logro determinar que la influencia de la humedad influye en el precio del gas pobre de madera pero a su vez no afecta mucho en el precio final de la electricidad, se vario tanto la humedad del combustible como su recio y pudo constatare que el precio de la electricidad no difería mucho del entorno de los 0,13 centavos dólar/kWh.

## AGRADECIMIENTOS

A la Comunidad Europea por los esfuerzos y el financiamiento del Proyecto Alfa II - 0442, y especialmente a la persona del Dr. Rolando Zanzi por ser tan atento y preocupado con nosotros, al profesor Dr. Jose Luz Silveira de la Universidad Estatal Paulista, Campus de Guaratinguetá por su acogida. Al Dr. Ramon Cala Aiello por confiar.

## BIBLIOGRAFIA

Baja, L. 1983. Promotion of producer gas projects in the Philippines. Ibid. p. 519-527.

Beagle, E.C., Gasifier-Stirling, an innovative concept. In: INTERNATIONAL PRODUCTION GAS CONFERENCE, 1., 1982.

BRANDINI, A. *Experiencias con gasificadores en el Brazil*: manual de curvas de gasificación de la madera en Centro América y el Caribe. Pp. 308-320. Olade, 1938. p. 308-

320.

BRIZI, F. *Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system*: Comparision between natural gas and biogas. [S.l.], 2002. p. 50 - 71.

FOLEY, G.; BARNARD, G. *Biomass gasification in developing countries*. London: Earthscan Technical Report, 1983.

Horta N. L. A, Lora Silva E. E. *Dendroenergia*: Fundamentos e Aplicações. 2 ed.

Kissin, I. *Gas producers for motor vehicles and their operation with forest fuels*, Oxford: Imperial Forestry Bureau, 1942.

Kulasinghe, A.N.S. *Experiences with low cost gasifiers in Sri Lanka* : producer gas 1982. Stockholm: the Beijer Institute, 1983. p. 279-300.

Silveira J. L. Cogeração Disseminada para pequenos usuários; estudos de casos para o setor terciário, Tese (Doutorado)- Universidade de Campinas, 1994.

TIEDEMA, P., VAN DER WEIDE, J. AND DEKKER, H.J. *Converting diesel engines to the use of gaseous fuels*. producer gas. Stockholm: The Beijer Institute, 1983. p. 393-414.

Vlassov, Dmitri. 2001. Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão.