



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50<sup>th</sup> anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

## FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

## CONTACT

Please contact [publications@unido.org](mailto:publications@unido.org) for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at [www.unido.org](http://www.unido.org)

REDUCIDO

20 June 1989  
ESPANOL

17600

DEMOSTRACION DE LAS TECNOLOGIAS DE GASIFICADORES Y BIODIGESTORES  
PARA ENERGIZACION RURAL POR VIAS NO CONVENCIONALES

DP|PAR|88|011|11-51

PARAGUAY

Informe técnico: Gasificación de Leña y Carbon Vegetal\*

Preparado para el Gobierno del Paraguay  
por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial  
actuando como organismo de ejecución para el Programa  
de las Naciones Unidas para el Desarrollo

Basado en el estudio de Mario Oscar Cencig  
Consultor en Gasificación de Leña

Oficial de apoyo: R. O. Williams, Sección de Industrias Químicas

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial  
Viena

---

\* Este documento ha sido reproducido sin edición oficial

## RESUMEN

El presente informe técnico es el resultado de las observaciones realizadas y las discusiones de trabajo mantenidas con el personal del Proyecto DP/PAR/88/011 en el marco de una misión conjunta de acompañamiento del Dr. Huub Stassen, Director del Biomass Group Technology (BTG), Twente University (Holanda), durante el período comprendido entre el 8 y el 22 de mayo de 1989.

## INDICE

1.	INTRODUCCION	Página 1
2.	OBSERVACIONES REALIZADAS	
	2.1 Rio Verde	2
	2.2 Facultad de Ciencias Químicas	2
	2.3 Colonia Mennonita (Loma Plata)	4
	2.4 Teniente Pico	6
3.	COMENTARIOS	
	3.1 Proyecto para Rio Verde	7
	3.2 Facultad de Ciencias Químicas	9
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	17
5.	REFERENCIAS	21
	Anexo: BALANCES DE MASA Y ENERGIA	23

## 1. INTRODUCCION

El antecedente de este proyecto de demostración es el proyecto del PNUD/ONUDI PAR/83/010 que asistió a la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA) entre 1983 y 1987 para el desarrollo de la tecnología de gasificadores y biodigestores.

El presente proyecto del PNUD/ONUDI, PAR/88/011, tiene por objetivo "demostrar y evaluar las tecnologías de gasificadores y biodigestores para el suministro de energía y combustibles en el Chaco Paraguayo por medio de un programa de ensayos en localidades típicas de esa región", a ser ejecutado por la FCQ.

Las partes interesadas son la Comisión para el Desarrollo Integrado del Chaco y el Fondo Ganadero, que se comprometen a proveer los locales, el personal, la materia prima, los servicios de mantenimiento, gastos de movilidad, alojamiento y viáticos, objetivando que estos locales se conviertan en centros difusores de las tecnologías demostradas, continuando los trabajos después de la finalización del proyecto, y abriendo líneas de crédito para que futuros usuarios puedan adquirir los equipos correspondientes.

La propuesta inicial para ser evaluada por los componentes de esta misión incluía la instalación de gasificadores de leña de 20 kW en una (o en ambas) de las localidades de Rio Verde y Teniente Pico, en el Chaco Paraguayo, además del levantamiento del estado del arte de la tecnología de gasificación en la FCQ, así como de su infraestructura material y de personal.

## **2. OBSERVACIONES REALIZADAS**

Fueron realizadas observaciones en las instalaciones civiles existentes en Rio Verde, en los gasificadores instalados en la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA), y de los gasificadores en funcionamiento en la Usina de Electricidad de la Colonia Mennonita situada en Loma Plata, a 425 km de Asunción.

### **2.1 Rio Verde**

Es un pequeño nucleamiento poblacional en la localidad denominada Rio Verde (a 325 km de Asunción), a las márgenes del rio y sobre la ruta Trans-Chaco (asfaltada), sede de la futura expansión en la región del Chaco [1], y que tiene menos de un año de existencia.

En las instalaciones de la futura sede administrativa está funcionando una escuela, hay un galpón para obras y alojamiento de personal, un tanque australiano para coleccionar el agua de lluvia, el área total es de 43 Ha y hay una decena de familias dispersas en los alrededores.

Para proveer electricidad, existe un motor de ciclo Diesel que acciona un generador eléctrico de 10 kVA; en el momento de la visita, el sistema no estaba en operación pues el generador se encontraba en Asunción (ya hacía 2 meses) sufriendo reparaciones.

La demanda de energía fué estimada en 2-3 kW, con posibilidades de crecer hasta 5 kW a medio plazo.

### **2.2 Facultad de Ciencias Químicas**

#### **Antecedentes**

Los dos gasificadores de carbón vegetal, fabricados por la industria Siquieroli (en Minas Gerais, Brasil), inicialmente instalados (primero semestre de 1986) en una camioneta y en un grupo motor-generador en el marco del Proyecto DP/FAR/83/010 están actualmente desactivados, habiendo sido documentado el trabajo realizado con dichos equipos [2,3,4].

Las horas de operación fueron estimadas en 70-80 horas efectivas para el grupo motor-generador (ver referencia [2], páginas 23 y 41), y para la camioneta un viaje de 280 km y varios viajes de 40 km con frecuencias de 3 veces por semana.

Los problemas encontrados: el motor de la camioneta se paraba, el generador eléctrico no daba los 20 kVA, ocurrió fusión de partes de los gasificadores (toberas, paredes), aparición de excesiva cantidad de agua en los filtros, etc. Fueron efectuadas diversas modificaciones (reemplazos del regulador de rotaciones, del ventilador, de la bobina y la batería, agregado de una camisa de agua y una parrilla móvil en el gasificador), y hubo asisten-

cia de diversos técnicos.

No están claras las razones por las cuales estos equipos fueron desactivados. Aparentemente, no funcionaban satisfactoriamente, pero no fue posible determinar el grado de esfuerzos sistemáticos llevados a cabo para resolver las causas de los problemas, y que relación esto tendría con la decisión de construir los nuevos gasificadores.

#### Situación actual

-----

Son dos los gasificadores en operación, uno de leña y otro de carbón vegetal. El primero fué construído durante el segundo semestre de 1986 y comenzó a operar a inicios de 1987; el segundo demoró mas en su construcción y comenzó a operar más tarde.

El gasificador de leña, del tipo flujo descendente o co-corriente, alimenta un motor de diesel Mercedes Benz OM 352 (5675 cc, 75 CV, 1500 RPM, 17:1) que acciona un generador Bambozi de 25 kVA (trifásico, 380 V, 50 Hz, 1500 RPM), trabajando el motor en un sistema de alimentación dual (diesel + gas). La leña entra en pedazos de 10 cm x 15 cm con humedad entre 14-20 %, y la inyección de aire en el gasificador es hecha a través de 5 toberas radiales; en el fondo del gasificador hay una parrilla móvil (en forma manual y externa) para retirar la ceniza de la zona de reacción. El gas pasa sucesivamente a través de un ciclón, una torre de lavado con agua y voluminosos filtros de aserrín, mezclándose con el aire en un tubo en "T" unos 10 cm antes de la entrada al motor.

El gasificador de carbón vegetal, del tipo flujo cruzado, alimenta un motor de gasolina Volkswagen (1300 cc, 46 CV, 4000 RPM, 6,8:1; 2500 RPM en régimen de trabajo con el generador) que acciona un generador Danyo de 5 kVA (monofásico, 110/220 V, 50 Hz, 1500 RPM). La tobera es refrigerada con agua por un sistema de termo sifón, y en el fondo del gasificador hay una parrilla, que puede ser movida a mano desde afuera, para retirar la ceniza de la zona de reacción y evitar que funda. El gas pasa sucesivamente a través de un ciclón, un radiador con convección natural para enfriarlo, un filtro de virutas + aserrín, y un filtro de papel para retirar partículas, mezclándose con el aire en un tubo en "T" unos 10 cm antes de la entrada en el motor.

La experiencia acumulada con estos equipos es de unas 200 horas de operación con el gasificador de leña, y unas 50 horas con el de carbón.

Durante la misión realizada, fue observado el funcionamiento de ambos sistemas, en forma cualitativa ya que no se disponía de facilidades suficientes para la obtención de datos.

El problema encontrado en el Prototipo No. 1 (gasificador de leña con generador de 20 kVA) durante la experiencia realizada fué el funcionamiento irregular del motor ("golpeteo") y el consumo de diesel (7,2 litros/h, representando una economía de 14

% de combustible líquido cuando comparado con el funcionamiento con 100 % diesel), y los mejores valores alcanzados [2] son de una mezcla de 36 % de diesel y 64 % de gas.

El problema encontrado en el Prototipo No. 2 (gasificador de carbón con generador de 5 kVA) fué la dificultad de encendido y el bloqueo del filtro de papel por el agua, mayormente debidos al no acondicionamiento apropiado del carbón antes de la carga en el gasificador; también, cierta dificultad en la regulación del caudal de aire comandada por el controlador de velocidad. Superado el problema del encendido, el sistema soporta una carga de 4 kW con las especificaciones de voltaje y frecuencia requeridos.

### 2.3 Colonia Mannonita (Loma Plata)

Consistió en una rápida visita, en la cual fueron constata- das las diversas modificaciones realizadas con respecto a la situación a fines de 1987 ya descripta en un informe anterior [5]. Las mismas consisten en: inyección de aire a través de una tobera central (con lo cual disminuyó apreciablemente la cantidad de alquitrán en el gas), refrigeración con agua por sistema de termo sifón del inyector de aire en el gasificador (esto resolvió el problema de fusión ocurrido con los dos picos, de cerámica y de grafito probados anteriormente, y funcionando satisfactoria- mente hace un año), reemplazo del émbolo hidráulico para la carga del material por la alimentación directa mediante la cinta transportadora (esto eliminó el problema de atascamientos en el émbolo), la ceniza sale del ciclón por gravedad y no más por un tornillo sin fin (con lo cual no hay problemas de acumulación de material), fué finalmente eliminado el filtro electrostático y se usa uno de carbón después del lavado del gas (para retirar hume- dad); la tercera línea de gasificación comenzó a operar este año.

Los principales resultados de la operación de la usina están indicados a continuación, cedidos gentilmente por el Sr. P. H. Penner, Sub Gerente Técnico de Industria y el Ing. N. Cañete, del Departamento Técnico de Chortitzer Komitee.

Tabla 1: Datos de la Usina de Electricidad de Loma Plata (5/89).

AÑO	PRODUCCION (kWh)	DIESEL		LENA		AHORRO US\$
		CONSUMO (litros)	COSTO US\$	CONSUMO (kg)	COSTO US\$	
1983	884.090	353.636	27.972	1.708.946	6.275	21.697
1984	3.227.080	1.290.832	170.648	7.180.946	30.422	140.226
1985	3.510.740	1.404.296	201.516	6.561.573	27.801	173.715
1986	3.845.430	1.538.172	262.412	6.879.474	33.035	229.377
1987	3.868.080	1.547.232	314.707	6.970.280	45.286	269.421
1988	3.940 mil*	-	-	-	-	-
1989	1.940 mil*	-	-	-	-	-
21.217.680		* estimado		1 US\$=885 ¢		1.944.282

La Figura 1 ilustra la variación en la composición de la mezcla gas + diesel durante la operación de la planta, y la diferencia de valores con la Tabla 1 proviene de la existencia de 3 grupos diesel de 920 kW (total) como auxiliares.

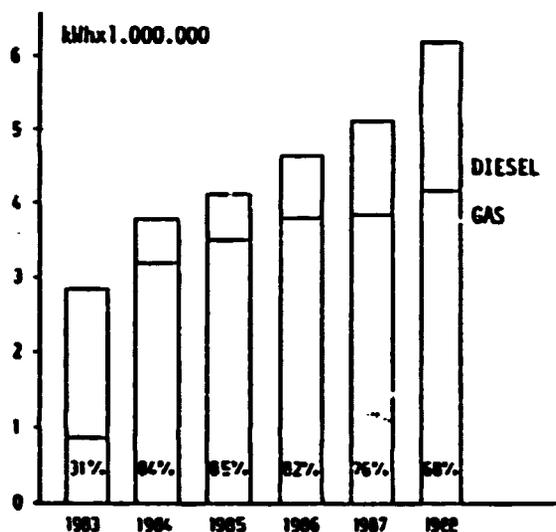


Figura 1: Evolución del consumo de combustibles.

En la Usina hay 3 grupos motor-generator Waukesha de 420 kW-50 Hz-trifásicos cada uno, que entre mayo/83 y mayo/89 funcionaron durante 27.844, 30.556 y 19.244 horas, respectivamente, produciendo 7.518.380, 8.436.550 y 5.262.750 kWh. El factor de utilización fué de 73,8 % en horas de trabajo. Son también 3 gasificadores de leña, donde el último comenzó a funcionar en este año. La Tabla 2 muestra datos del rendimiento de la planta.

Tabla 2: Datos del rendimiento de la Usina.

ANO	CONSUMO LENA (kg/kWh)	COSTO (US\$/MWh)
1983	1,933	7,1
1984	2,225	9,4
1985	1,869	7,9
1986	1,789	8,6
1987	1,802	11,7

Así, la planta consume (valores medios hasta diciembre de 1988) 7 mil toneladas de leña por año, produciendo cerca de 3,9 millones de kWh, con un rendimiento de 1,9 kg/kWh; actualmente, el precio de la energía eléctrica es de 0,060 US\$/kWh, donde la mitad de ese valor proviene de la leña.

Los principales problemas que nos fueron informados son: la necesidad de parar a cada 2 semanas para efectuar una limpieza completa del sistema de los filtros, problema ya apuntado anteriormente [5], y la magnitud de los problemas con los materiales (fusión, corrosión) en la zona de alta temperatura del gasifica-

dor ("garganta del diablo").

#### 2.4 Teniente Pico

Por problemas operacionales, no me fué posible visitar el sitio en Teniente Pico indicado en el proyecto como uno de los locales posibles para la instalación de un gasificador, no habiendo por lo tanto observaciones a relatar.

### 3. COMENTARIOS

#### 3.1 Proyecto para Rio Verde

Con respecto a la idea inicial, de instalar un gasificador de leña para 20 kW de potencia en Rio Verde, la misma tiene las siguientes desventajas: no hay demanda suficiente, con lo cual el gasificador trabajaría con una baja eficiencia (o sea, altos costos), y el lugar está situado sobre la ruta, lo que hace sumamente fácil el abastecimiento de diesel para operar el sistema existente.

Se puede hacer una estimativa económica simplificada comparando los dos escenarios, usando los datos disponibles [2], para ilustrar este punto en una situación hipotética posible.

##### a) Grupo motor Diesel-generator

-----  
Potencia efectiva: 4 kW  
Tiempo de uso: 5 horas diarias  
Consumo de diesel: 1,9 litro/h  
Precio del diesel: 220 ¢/litro = 0,247 US\$/litro  
Mano de obra (50 % salario mínimo): 66,3 US\$/mes

Tomando por base un año:

	US\$/año
	-----
Diesel	856,5
Mano de obra	795,6
	-----
Costo de operación	1652,1
Depreciación (*)	1000,0
	-----
Costo de producción	2652,1
Energía generada	7300 kWh/año
Precio de la energía	0,363 US\$/kWh

(\*) se considera una vida útil de 10 años para el grupo motor-generator (10 % aa), cuyo precio es 8.900.000 ¢ = 10.000US\$ (ref [2]: 1 US\$=890 ¢). Inversión: 0 ¢.

##### b) Gasificador de leña de 20 kW

-----  
Potencia efectiva: 4 kW  
Tiempo de uso: 5 horas diarias  
Consumo de leña: 1,5 kg/kWh  
Precio de la leña: 5 ¢/kg = 5,62 US\$/t  
Mano de obra (1 salario mínimo): 132,6 US\$/mes  
Inversión: (13.632.130 - 8.900.000) ¢ = 5.317 US\$

La inversión es proveniente de la compra del gasificador para acoplar al sistema motor-generator ya existente; el costo de la mano de obra es mayor porque exige un trabajo más calificado que el de la operación de un motor con combustible líquido. En

este caso es:

	US\$/año
	-----
Leña	61,5
Mano de obra	1591,2
	-----
Costo de operación	1652,7
Depreciación (*)	2063,4
	-----
Costo de producción	3716,1
Energía generada	7300 kWh/año
Precio de la energía	0,509 US\$/kWh

(\*) 5 años de vida útil del gasificador (20 % al año)  
 10 años de vida útil del grupo motor-generador (10 % aa)

Este rápido estudio muestra que la energía generada con un gasificador de leña de 20 kW sería 50 % más cara que con el actual sistema de un motor movido a diesel, debido principalmente al hecho de que el gasificador está siendo sub utilizado en su capacidad. La otra desventaja es que, por la ubicación de Rio Verde, cualquier dificultad operacional con el gasificador sería un fuerte impulso para volver al diesel y olvidar la alimentación con gas.

Así, el efecto de demostración sería contraproducente, ya que "se estaría gastando mucho para producir poco (y caro)", y la continuidad del proyecto estaría sujeta a futuras consideraciones sobre la falta de economicidad del mismo.

Si en cambio fuese usado un gasificador de 4 kW de potencia -en cuyo caso sería de carbón vegetal y no de leña, por ser más apropiado para pequeñas potencias y de manejo más simple- en este caso se tendría:

Precio del carbón: 30 ¢/kg = 33,7 US\$/t  
 Consumo de carbón: 1,5 kg/kWh  
 Inversión: 2.990.000 ¢ = 3.360 US\$

	US\$/año	US\$/año	
	-----	-----	
Carbón	369,0	738,0	
Mano de obra	1672,8	3345,6	
Depreciación (*)	435,9	435,9	
	-----	-----	
TOTAL	2477,7	4519,5	
Energía generada	7300	14600	(kWh/año)
Precio de la energía	0,339	0,310	(US\$/kWh)

(\*) 5 años de vida útil del gasificador (20 % al año)  
 10 años de vida útil del grupo motor-generador (10 % aa)

donde la primera columna corresponde a una utilización de 5 horas

diarias, y la segunda fué calculada para una situación de uso de 10 horas diarias.

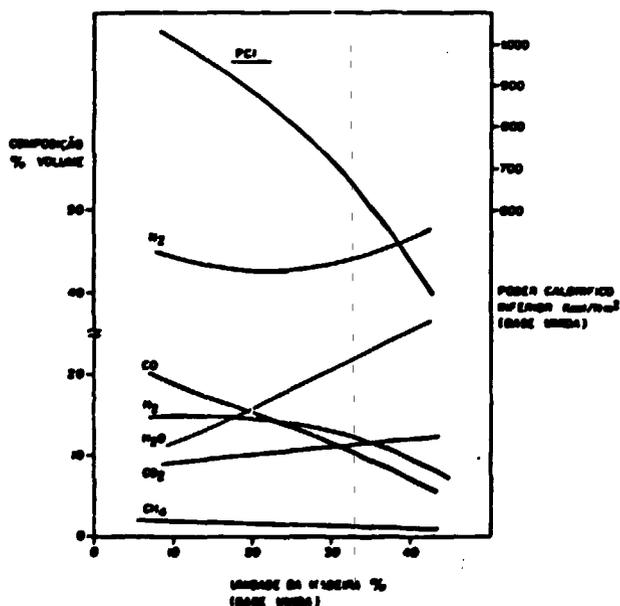
Estos números muestran que el menor precio del combustible, comparado con el diesel, acaba compensando los mayores costos de operación (mano de obra especialmente) y de inversión de los sistemas con gasificadores cuando el sistema elegido es compatible con las necesidades (no está sobredimensionado). Es claro que la grande ventaja comparativa de la generación de electricidad usando gasificadores, frente al diesel (u otro derivado de petróleo), es la posibilidad de pasar de un tiempo limitado de servicio con el diesel (5 horas en este ejemplo) debido a dificultades de abastecimiento (por ejemplo, en locales aislados o lejanos), a una situación de oferta de electricidad durante un período mayor, lo que significa un mayor impulso a las actividades y más confort en general.

### 3.2 FCQ/UNA

#### Prototipo No. 1

Con respecto al gasificador de leña, la falta de conocimiento de la temperatura del gas a la salida del gasificador y de su composición (debido al no funcionamiento en ese momento del Orsat), no permitieron evaluar en forma objetiva el desempeño del gasificador, así como la falta de un medidor del contenido de alquitrán y partículas en el gas no permitió determinar la eficacia del sistema de filtros.

Entretanto, a partir de los datos de diseño fué concluído que el gasificador es adecuado para un sistema de potencia de 20 kW con ese motor, y que desde ese punto de vista está correcto.



Es interesante ver el ámbito de variación de la composición y del poder calorífico del gas para el caso de un gasificador similar de madera de eucalipto [6], en función de las condiciones de operación (en este caso particular, del contenido de humedad de la madera), y la Figura 2 ilustra este punto.

Figura 2: Composición y PCI del gas (vs) humedad de la leña.

También, hay variación en el poder calorífico de la leña en función de la especie, aun cuando no sea tan importante como lo es en el caso del carbón vegetal. Para las maderas brasileñas, se encuentran valores [7] que van desde 3.000 a 5.400 kcal/kg para la madera seca, con valores medios de 4.500 y 4.200 kcal/kg para los poderes caloríficos superior e inferior, respectivamente. El Anexo trae mayores consideraciones sobre la influencia de los varios parámetros sobre la calidad del gas producido (en particular, debería mantenerse el contenido de humedad menor que 20-25 %).

Con respecto a la cuestión de trabajar con mezclas diesel + gas, el mayor rendimiento obtenido con este equipo hasta el momento [2] es de 34 % diesel + 64 % gas, y la dificultad consiste en que si hay fluctuaciones en la calidad del gas, el diesel "acude" a proporcionar la potencia necesaria, con lo cual no es difícil que el gasificador "caiga" por debajo de su estado crítico (flujo de gas demasiado pequeño y disminución de la temperatura) y deje de operar correctamente.

Podría ser posible obtener mejores rendimientos, ya que fueron desarrollados [8] tres gasificadores de carbón vegetal (tipos flujo cruzado y descendente) para alimentar sistemas de 3 potencias diferentes: motor MWM 225/6 con generador Toshiba de 60 kVA; motor MWM 232/8 con generador Toshiba de 135 kVA, o, motor Scania DN 11 con generador Negrini de 135 kVA; y motor Cummins 8559 con generador Negrini de 275 kVA, y todos operando con mezclas 10 % diesel + 90 % gas. Claro es que las potencias son bien mayores que los 20 kW del prototipo No. 1, y el combustible es carbón vegetal, siendo que el aumento de escala resuelve algunos problemas operacionales importantes.

Hay algunas recomendaciones importantes para usar los motores de ciclo Diesel con alimentación dual [9]: baja tasa de compresión e inyección directa (sin cámara de pre-ignición), superdimensionar el diámetro de la admisión del aire, y dosificar la bomba inyectora para reducir en 80-90 % la alimentación del diesel; esta última medida es la más importante [10,8], ya que así el 10-20 % de diesel mantiene el motor regulando y las sollicitaciones de potencia son atendidas por el gas.

Fué colocada por el Dr. Stassen la dificultad de optimizar el funcionamiento de estos motores con las mezclas diesel + gas, sugiriendo la conveniencia de cambiar el motor de ciclo Diesel por uno de gas natural que trabajase sólo con la alimentación del gasificador.

Habría así dos opciones para este gasificador de leña: continuar con el sistema como está, lo que demandaría trabajar encima del sistema de inyección de diesel y ajustar el punto del motor; o cambiar este motor por otro de gas, lo que exigiría la compra de un nuevo motor. La primera alternativa es más inmediata y barata, pero exige más mano de obra y bastante habilidad de los operadores, mientras que la segunda tiene la seguridad de que el motor vá a trabajar normalmente, pero es más cara y demorada

(exige importación).

Desde el punto de vista de los materiales -lo que influye directamente en la vida útil del sistema y, por consiguiente, en el análisis de costos- el tiempo de operación de este equipo es corto como para poder determinar la magnitud de los problemas posibles. De cualquier manera, la experiencia con los gasificadores de Loma Plata da una indicación sobre los mismos (ya descritos en la sección 2.3; en particular, pareciera que el problema levantado de corrosión en los filtros por los vapores piroleñosos no sería significativo).

#### Prototipo No. 2

-----

Con respecto al gasificador de carbón vegetal, los mismos comentarios que en el caso anterior sobre la dificultad de una evaluación objetiva (no hay datos sobre la composición del gas generado ni de su temperatura de salida del gasificador), si bien puede decirse que en funcionamiento el sistema satisface los requerimientos de potencia (4 kW) y de estabilidad (110/220 V, 50 Hz).

Fue calculada [4] la potencia que podría desarrollar el motor Chevrolet a 1500 RPM (del grupo motor-generador de 20 kW) para una determinada composición de gas [3], mostrando que en esas condiciones la potencia máxima alcanzable sería de 14,36 kW, o sea, 71,6 % del valor nominal. Utilizando esos mismos cálculos, es posible ver que si el poder calorífico del gas fuese aumentado de 1037 kcal/Nm<sup>3</sup> para 1250 kcal/Nm<sup>3</sup>, la potencia alcanzable subiría para 17,3 kW, mientras que si con el mismo gas se aumentase la rotación del motor para 2200 RPM, entonces la máxima potencia alcanzable sería de 21,0 kW.

En este sentido, es ilustrativo analizar los datos de la tabla que se encuentra en la página 41 del Informe Técnico [2], con los resultados de las experiencias realizadas con el gasificador Siquieroli acoplado al grupo motor-generador de 20 kW. Se observa una gran heterogeneidad del carbón utilizado y, a no ser los 3 primeros datos, los altos valores de volátiles junto con los (relativamente) bajos de ceniza y bajos de poder calorífico encontrados, estarían indicando que fue usado un material "insuficientemente carbonizado", o sea, un carbón fabricado probablemente a 400 °C (o menos) con la intención de disminuir el tiempo de operación y aumentar el rendimiento de la hornada, en lugar de trabajar con un carbón de 500-600 °C que sería más apropiado. Esto tiene como consecuencia la producción de un gas con contenidos (relativamente) bajos de CO e H<sub>2</sub> (y en menor medida metano) y altos de CO<sub>2</sub>, o sea, un gas de bajo poder calorífico.

La variación de las composiciones elemental e inmediata y del poder calorífico de carbones de eucalipto y babaçu en función de la temperatura de carbonización [11,12] pueden ser vistos en la Tabla 3 y la Figura 3.

Tabla 3: Análisis elemental de carbones de eucalipto.

TEMPERATURA (oC)	RELACION ATOMICA	
	H/C	O/C
leña (*)	1,667	0,833
200	1,446	0,594
300	0,803	0,224
400	0,551	0,122
500	0,415	0,056
600	0,337	0,042
800	0,125	0,026
1000	0,062	0,023

(\*) se asumen los valores 44,45 % C, 6,17 % H, 49,38 % O  
(C H O) como representativos de la leña seca.  
6 10 5

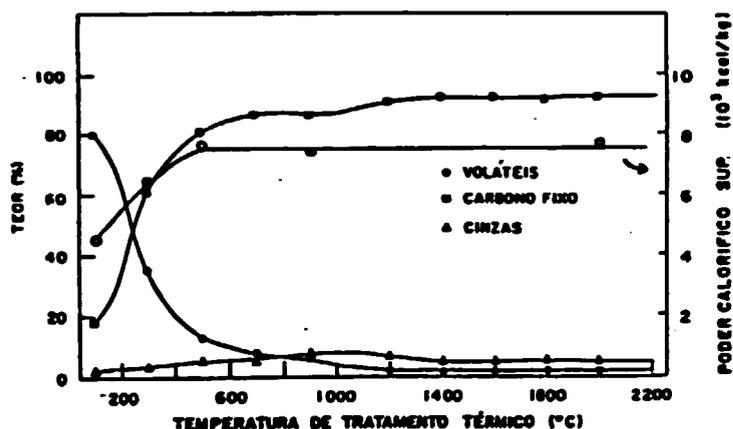


Figura 3: Análisis inmediato y Poder calorífico (vs) T de carbonización del babaçu.

Se observa que el intervalo que presenta variaciones significativas en las características del carbón está en temperaturas de carbonización entre 350 y 650 oC, que comprende la mayoría de los procesos corrientes de fabricación del carbón vegetal. Para el tipo de hornos normalmente utilizados en Minas Gerais (de "rabo quente") fué encontrado [13] que la media de 13 hornadas, en el mismo horno, dió los siguientes valores para el carbón de eucalipto:

	±	desvío padrón
humedad	4,37	1,25
volátiles	18,21	3,94
C fijo	80,04	4,35
ceniza	1,75	0,70

debido a la inhomogeneidad de la temperatura en el interior del horno, lo que es una variación razonable. En el caso de los carbones chaqueños, hay una complicación extra debido al uso de diferentes clases de leñas; entretanto, es posible preparar car-

bones de calidad razonable: en un proceso controlado de fabricación [14] a partir de una dozana de maderas chaqueñas fueron obtenidos carbones con poderes caloríficos en torno de 7.000 kcal/kg con una faja de variación de 5 %, con volátiles entre 13,8 y 27,4 %, C fijo entre 67,4 y 82,6 %, y ceniza entre 2,1 y 14,9 %, por carbonización a temperaturas medias entre 347 y 546 oC. Todo esto tiene influencia en parámetros como reactividad, porosidad y densidad que son importantes en el proceso de gasificación.

El problema del carbón no cumplir las especificaciones es crucial, y en tal sentido fué nuevamente enfatizada la necesidad de su preparación previa y discutido un sistema de secado del mismo aprovechando los gases de escape del motor, para no depender del estado en que los proveedores traen el carbón y/o de las condiciones climáticas (no es raro encontrar lotes de carbón con 20-25 % de humedad). La Figura 4 ilustra el sistema discutido; el secado sería realizado en batch, y el carbón sería estocado en recipientes cerrados para evitar la absorción de humedad debido a la característica higroscópica del carbón.

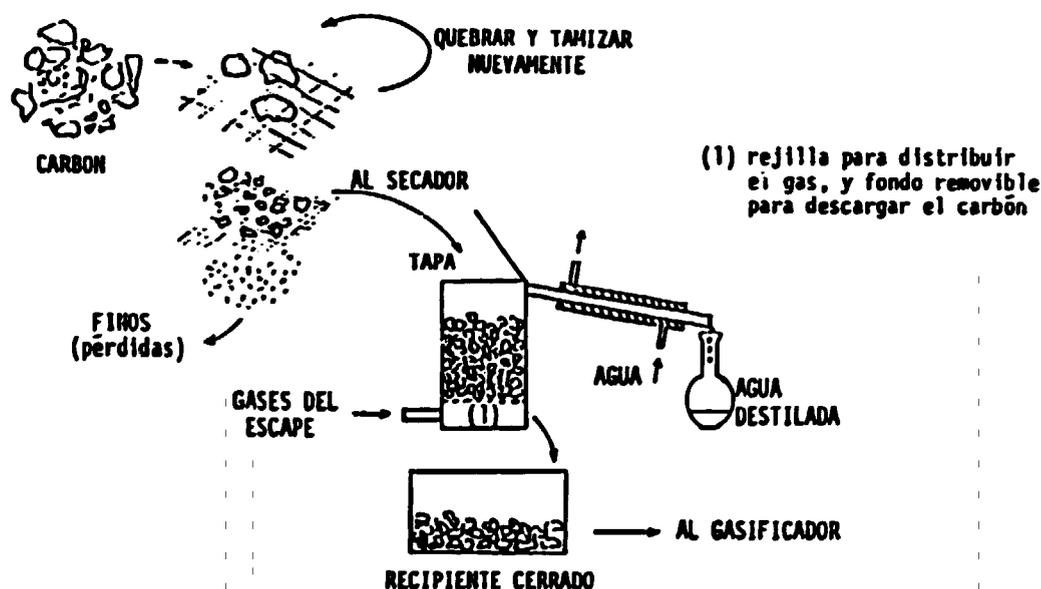


Figura 4: Sistema para acondicionar el carbón.

Los gases de escape del motor pueden ser usados, también, para resolver el problema de la aparición de material depositado en la mariposa de admisión del aire al carburador (lo que dificulta la regulación), a través de un precalentamiento del aire que va a mezclarse con el gas, a fin de igualar las temperaturas y evitar la condensación.

Con respecto a la aparición de agua en el filtro de papel, y consiguiente bloqueo del mismo al paso del gas, la conclusión es que el enfriador-condensador (instalado a la salida del gasificador) y el filtro de virutas + aserrín no están trabajando adecuadamente.

Hay tres maneras de solucionar este problema: a) mejorar el intercambio de calor en el condensador (por ejemplo, con el uso de un ventilador), de manera que el agua quede retenida allí y no llegue al filtro de papel; b) calentar el filtro de papel con el propio gas antes de que entre en él, dejando que el agua que no alcanzó a condensar en el enfriador-condensador vaya condensando por la tubería antes de llegar al carburador; c) modificaciones del diseño, consistentes en reemplazar el enfriador-condensador y el filtro de papel por un filtro de temperatura seguido de un lavador del gas y de un filtro de relleno para absorber la humedad residual. La Figura 5 presenta las alternativas indicadas.

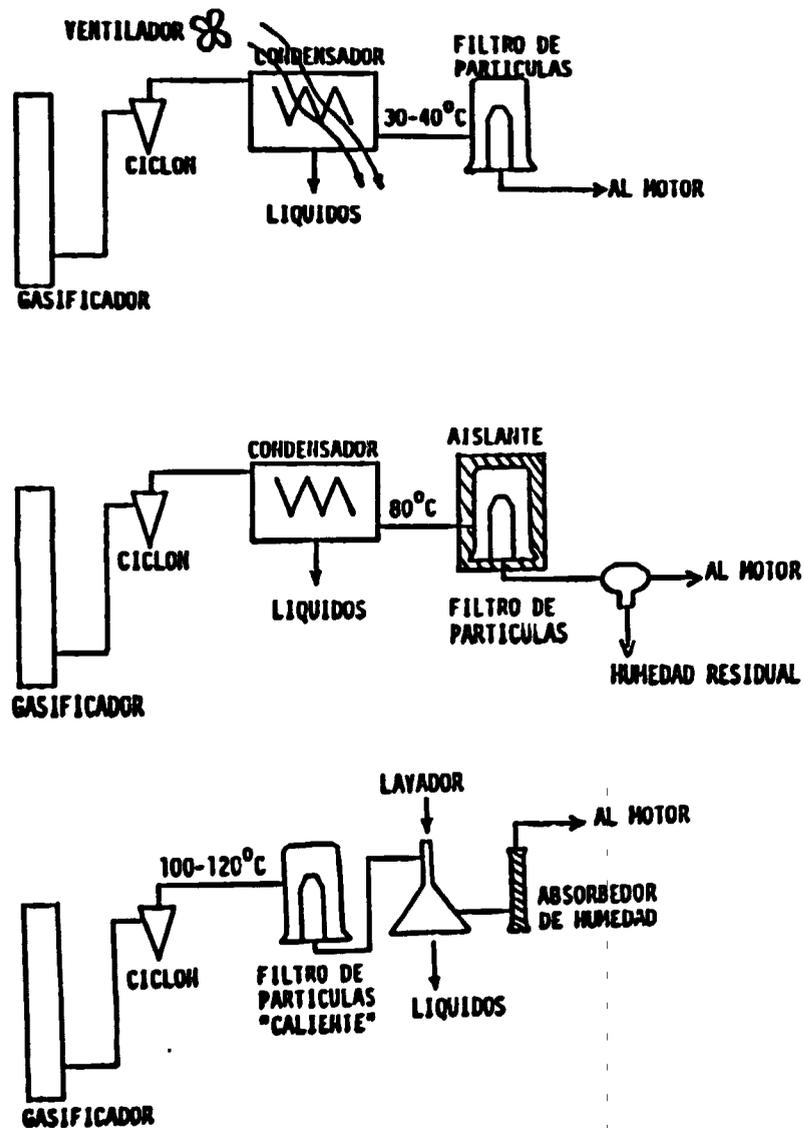


Figura 5: Purificación del gas.

En el primer caso, el filtro de virutas + aserrín no sería necesario si el condensador trabajase adecuadamente, o eventualmente podría ser colocado uno pequeño antes del de papel para eliminar una posible neblina.

El segundo caso busca evitar que el agua condense en el filtro de papel frío, calentándolo con el propio gas a ser filtrado, y dejando que la condensación ocurra después. Esto depende de la T del gas al salir del enfriador-condensador, y tal vez sea necesario colocar un filtro de relleno antes del carburador para absorber la humedad residual.

El tercer caso elimina el actual sistema de filtros y lo reemplaza por otro; la ventaja es que el lavado con agua elimina también los vapores condensables que pudiera haber en el gas, pero en compensación exige un eficiente filtro de relleno para secar el gas después de esta etapa.

Desde el punto de vista operacional, el orden de tentativa de solución sería el que fué usado para describir las 3 alternativas, partiendo de la más simple e inmediata para la más compleja y demorada.

De cualquier modo, en la gasificación de carbón vegetal hay consumo neto de agua, al contrario de lo que sucede en la gasificación de la madera, por lo que la aparición de agua en el gas provocando problemas en los filtros vá a depender de que los contenidos de humedad del carbón y del aire sean mayores o no que lo requerido por la estequiometría global de la reacción, tal como es mostrado en los balances de masa del Anexo.

En conclusión, es importante que el carbón sea controlado en su granulometría (2-5 cm) y en su contenido de humedad (menor que 8-10 %) y de volátiles (no mayor de 20 %, y con C fijo no menor de 70 %) antes de ser introducido en el gasificador para funcionar, a fin de evitar pérdidas de tiempo después. A efectos de realizar los balances de masa y energía, determinar también la composición elemental (C,H,O) y el poder calorífico.

#### Infraestructura

-----

Con respecto a la infraestructura material y de personal locales para la realización del Proyecto de Demostración propuesto, las siguientes observaciones son pertinentes:

- hay capacidad local para la construcción y montaje de los sistemas basados en gasificadores de carbón vegetal y leña,

- es necesario mejorar la infraestructura del laboratorio en lo tocante a nuevos equipos y más personal, así como recibir una asistencia en las técnicas de análisis de laboratorio, a fin de realizar una evaluación más completa del funcionamiento de los gasificadores, basada en la medición de los parámetros determinantes del proceso (composición, temperaturas y flujo del gas generado, caídas de presión a lo largo de la línea, contenidos de alquitrán y partículas, análisis elemental e inmediato y poder calorífico del carbón y de la leña), de acuerdo a procedimientos padronizados [15].

- no hay capacidad plena de diseño de los gasificadores, siendo necesaria la asistencia en las cuestiones teóricas de los mismos.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La biomasa ocupa un lugar central en la matriz energética del Paraguay. En 1984 [16], la situación era la siguiente (los valores son en \$ salvo indicación en contrario):

	LERA	RAYF	CV
Oferta interna bruta primaria	70,6	15,3	-
Generación de electricidad	17,6	3,3	-
"    por autoprodutores	62,5	12,1	-
Producción (tEP)	1362	551	69,16
Sectores de consumo de leña:			
residencial y comercial	73,1		
industrial	25,7		
transporte	0,9		
Consumo (mil tEP)	1235,4	289,7	69,16
Consumo final energético	57,38	13,46	3,21
Consumo por sectores:			
residencial y comercial	85,1	-	6,5
transportes	2,67	-	-
industrial	48,86	41,42	-
público y otros	34,0	-	-
consumo propio	-	77,42	-

RAYF: residuos agrícolas y florestales      CV: carbón vegetal

Las tendencias más significativas mostradas en esa época por los gráficos eran las siguientes:

- oferta interna bruta: crecimiento de los RAYF y leve disminución de la leña,
- generación de electricidad: disminución de los \$ de la leña y los RAYF,
- la producción de leña no presentaba variación significativa,
- la producción y el consumo de carbón vegetal estaban en franco aumento,
- el consumo de RAYF estaba en aumento,
- sector residencial y comercial: el consumo de leña en disminución,
- sector industrial: el consumo de leña en lenta disminución, y el de los RAYF en aumento,
- sector público: fuerte disminución del consumo de leña,
- consumo propio: fuerte aumento del consumo de RAYF.

Así, aumentos de eficiencia en las tecnologías de uso de biomasa en general, y de la leña en particular, son de gran importancia.

Cualquier programa de I & D industrial que tenga por objetivo el aprovechamiento de una nueva tecnología debe tomar en cuenta los siguientes aspectos: a) aumentar el caudal de conoci-

mientos y de recursos humanos; b) utilización plena de los insumos y recursos locales disponibles; c) verificación de cuales son los productos necesarios para el país (y aquí entra la cuestión del mercado interno y del balance importaciones/exportaciones); y, finalmente, d) cuales las tecnologías utilizadas (y aquí entran los aspectos técnicos, los de transferencia de tecnología y los económico-financieros que son los que, en última instancia, viabilizan su implantación).

Por otro lado, las fases que son recorridas comprenden: la investigación en escala de laboratorio, el desarrollo tecnológico y de prototipos, el proyecto conceptual, la planta piloto o de demostración, y, finalmente, la operación comercial. Cada fase tiene sus propios ritmos, y el paso de una a otra exige inversiones crecientes.

Por lo tanto, es importante que haya un "casamiento feliz" entre la tecnología, el lugar y el momento de su aplicación para que los resultados sean positivos.

La idea del presente proyecto de demostración es que los gasificadores, así como los biodigestores, sean operados en el local y haya una evaluación técnico-económica de los mismos, lo que quiere decir que alguien debe pagar los costos. Así, los gasificadores van a conseguir imponerse sobre los combustibles líquidos actualmente utilizados (con el barril de petróleo a 14-18 US\$), si demuestran su viabilidad técnica de operación y su economicidad frente a las otras alternativas.

En función de estos objetivos, y a partir de las observaciones realizadas y con base en los comentarios hechos, es recomendado el siguiente Conjunto de Medidas para el éxito del proyecto:

- \* Complementar la infraestructura de equipos y personal del laboratorio de la FCQ, ya previsto en el Proyecto. En particular: la instrumentación de los prototipos 1 y 2 con sensores de temperatura, medidores del flujo de gas (tipo Venturi), muestreadores/medidores del contenido de alquitrán y de partículas en el gas, y contratación de un técnico electromecánico. También es importante el envío de personal local para ser entrenado en las diversas técnicas analíticas.
- \* Introducir las modificaciones sugeridas en los dos prototipos de la FCQ: sistemas para secado y ajuste de la granulometría del carbón, sistema de filtros en el prototipo No. 2, posibilidad del reemplazo del motor Diesel por uno de gas natural en el prototipo No. 1 (sujeto a decisión).
- \* Realizar la evaluación del funcionamiento de los dos prototipos con base en los datos obtenidos, e introducir sus resultados en el diseño de los sistemas a ser montados en los locales de demostración.

- \* Fué sugerida por el Dr. Stassen, y comparto esa opinión, la siguiente metodología de trabajo: entrenar un operador durante 3-5 días en todos los pasos con el gasificador de carbón de 4 kW (acondicionamiento del carbón, operación del sistema, limpieza y manutención), y colocarlo a trabajar durante 1 mes operando 4-5 horas diarias en forma continua. Observar la aparición de problemas y, si los hubiera, determinar las causas y realizar las correcciones correspondientes.
- \* Superadas estas etapas en forma satisfactoria, se procedería a construir e instalar en uno (o en ambos) de los locales indicados (Rio Verde, Teniente Pico) un sistema compuesto por un gasificador de carbón vegetal, motor de ciclo Otto y generador eléctrico de 5 kVA, además de un horno de carbonización para la preparación del carbón (a menos que éste pueda ser comprado en el local) y su correspondiente sistema de acondicionamiento.
- \* Con respecto a la lista de equipos a ser adquirida (anexo V del proyecto), en función de la secuencia indicada en los ítems anteriores las prioridades para la parte de gasificación serían las siguientes:

Para el(los) local(es) de demostración:

Gasificador(es) de carbón vegetal de 4-5 kW con motor de ciclo Otto y generador de 4-5 kVA  
 Orsat  
 Termómetros bimetal  
 Manómetros  
 Tablero(s)  
 Medidor(es) de flujo Venturi  
 Sistema(s) de muestro de alquitrán y partículas  
 Facilidades para la preparación y acondicionamiento del carbón

Para la FCQ:

Termómetros bimetal  
 Medidor de flujo Venturi  
 Sistema de muestreo y medición de alquitrán y partículas  
 Moor de gas natural para el Prototipo No. 1 (sujeto a decisión sobre esta cuestión)  
 Equipo para análisis elemental  
 Bomba calorimétrica para sólidos y líquidos  
 Multímetros

- \* El personal del laboratorio de la FCQ haría el seguimiento continuado de la operación del(de los) gasificador(es) instalado(s), así como continuaría con la operación y optimización de los equipos existentes en la FCQ.
- \* Algunos comentarios sobre los 6 primeros meses del Cronograma del proyecto, en función de los ítems anteriores:

MESES	1	2	3	4	5	6
Instrumentación y modificaciones en los prototipos						
Entrenamiento en las técnicas analíticas						
Preparación y caracterización de estoques de leña y carbón						
Evaluación de los prototipos						
Capacitación del operador						
Modificaciones en los diseños						
Construcción de los equipos de demostración						

## 5. REFERENCIAS

- [1] Urbanización Rio Verde: Capital económica del Chaco Paraguayo. Datos informativos, Asunción, 1977.
- [2] Programa DP/PAR/83/010. Desarrollo de tecnologías para el uso energético de la biomasa. Informe Técnico, E.VELAZQUEZ DE BARRETO - L.SAMANIEGO - N.CANETE, Asunción, marzo de 1988.
- [3] Sobre la gasificación de carbones vegetales y leñas. Informe Técnico (DP/PAR/83/010), M.O.CENCIG, Asunción, julio de 1986.
- [4] Informe referente al conjunto "gasificador-motor generador" de 20 kW movido con gas de carbón vegetal, N.CANETE. Asunción, septiembre de 1986.
- [5] Gasificador de leña, Loma Plata, Paraguay. Informe de Misión, W.R.PARK - A.OLIVEROS - E.DURAN - E.CABALLERO, 19 de septiembre de 1987.
- [6] O Processo CODEGAS de gaseificação de madeira, S.G.D'AVILA - Z.T.MAKRAY, Rev. Bras. Eng. Química 6, 1/2(1982).
- [7] Biomassa florestal como recurso energético, J.O.BRITO, ESALQ/USP, 1988.
- [8] Gaseificação para produção de energia elétrica, P.L.JARDIM DE MORAES, Anais do Seminário Brasil-Europa de Energia de Biomassa e Resíduos, Belo Horizonte, 11 a 15 de abril de 1988.
- [9] Gasogênios para motores, A.B.SIQUEIRA, en "Gaseificação de madeira e carvão vegetal", CETEC/SPT-004, Belo Horizonte, 1981.
- [10] Internal combustion engines and air pollution, E.F.OBERT, Harper & Row, New York, 1973.
- [11] Madeira como fonte de energia, H.MARTINS, en "Uso da madeira para fins energéticos", CETEC/SPT-001, Belo Horizonte, 1980.
- [12] Modelo granular, percolação-resistividade, RSE e módulo de elasticidade de materiais carbonosos: aplicação ao endocorpo de babaçu tratado termicamente até 2200 °C, F.G.EMMERICH, Tesis de Doctorado, UF/UNICAMP, 1987.
- [13] Propriedades do carvão vegetal, J.B.DE OLIVEIRA - P.A.GOMES - M.R.DE ALMEIDA, en "Carvão vegetal", CETEC/SPT-006, Belo Horizonte, 1982.
- [14] Fabricación de carbón vegetal a partir de espécies chagueñas, ONUDI PAR/82/004, C.A.LUENGO, Asunción, 1985.

- [15] UNDP/World Bank guidelines for field monitoring of small scale biomass gasifiers, ENERGY DEPARTMENT, The World Bank (Washington) and TWENTE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Enschede (The Netherlands).
- [16] Balance Energético Nacional. Años 1970-1984, Proyecto PAR/85/003 PNUD/BIRF, STP-División de Programación Energética, Asunción, julio de 1986.
- [17] Gaseificação de madeira e carvão vegetal. Princípios e aplicações, R.M.VIEGAS ASSUMPÇÃO, en "Gaseificação de madeira e carvão vegetal", CETEC/SPT-004, Belo Horizonte, 1981.
- [18] Coal gasification: Direct applications and synthesis of chemicals and fuels. Special Issue, S.S.PENNER (ed), Energy 12, 8/9(1987).
- [19] Utilização de gaseificadores no meio industrial, M.P.LOSSO, en "Produção e utilização de carvão vegetal", CETEC/SPT-008, Belo Horizonte, 1982.
- [20] Gaseificação industrial, H.A.KALLSCHEUER - L.A.M.DE SOUZA DUARTE, en "Produção e utilização de carvão vegetal", CETEC/SPT-008, Belo Horizonte, 1982.
- [21] Programa de gaseificação de biomassas da Petrobrás, J.P.MORO - I.A.TONIAL - F.R.KUGLAND DE AZEVEDO, Anais do Seminário Brasil-Europa de Energia de Biomassa e Resíduos, Belo Horizonte, 11 a 15 de abril de 1988.

**Anexo: BALANCES DE MASA Y ENERGIA**

La ecuación global de gasificación puede ser escrita como sigue:



donde x e y son determinados a partir del análisis elemental del material de partida (que mide % C, % H, % O en masa):

$$x = \text{relación atómica H/C} = \frac{12.3 \text{ H}}{\% \text{ C}} \quad (2)$$

$$y = \text{relación atómica O/C} = \frac{12.3 \text{ O}}{16.3 \text{ C}}$$

mientras que los números de moles deben satisfacer el balance de masa (el nitrógeno del aire no fué incluido porque no participa en la reacción, apareciendo el mismo número de moles en ambos lados de la ecuación).

Entonces, es:

$$\text{para el C:} \quad 1 = b + c + d \quad (3)$$

$$\text{para el H:} \quad x + 2g = 4d + 2e \quad (4)$$

$$\text{para el O:} \quad y + 2a + g = b + 2c + 2f \quad (5)$$

Por otro lado:

$$\text{número de moles de CO} = \frac{P \cdot V_{\text{CO}}}{RT} = \frac{PV \% \text{ CO}}{RT} \quad (\text{en volumen})$$

y lo mismo para los otros gases, donde V es el volumen total de gas producido, con lo cual se tiene:

$$\frac{b}{\% \text{ CO}} = \frac{c}{\% \text{ CO}_2} = \frac{d}{\% \text{ CH}_4} = \frac{e}{\% \text{ H}_2} = \frac{f}{\% \text{ O}_2} \quad (6)$$

Así, reemplazando c y d de (6) en (3) es:

$$1 = b + b \frac{\% \text{ CO}_2}{\% \text{ CO}} + b \frac{\% \text{ CH}_4}{\% \text{ CO}}$$

con lo cual:

$$b = \frac{\% \text{ CO}}{\% \text{ CO} + \% \text{ CO}_2 + \% \text{ CH}_4} \quad (7)$$

y con la ecuación (6) se calculan:

$$c = b \frac{\% \text{ CO}_2}{\% \text{ CO}}, \quad d = c \frac{\% \text{ CH}_4}{\% \text{ CO}_2}, \quad e = d \frac{\% \text{ H}_2}{\% \text{ CH}_4}, \quad f = e \frac{\% \text{ O}_2}{\% \text{ H}_2}$$

Con estos valores, se calcula g de la ecuación (4):

$$g = (4d + 2e - x)/2 \quad (8)$$

y reemplazando este valor de g en (5) se calcula a:

$$a = (b + 2c + 2f - y - g)/2 \quad (9)$$

### EJEMPLO 1: Gasificación de carbón vegetal.

Supongase la situación siguiente:

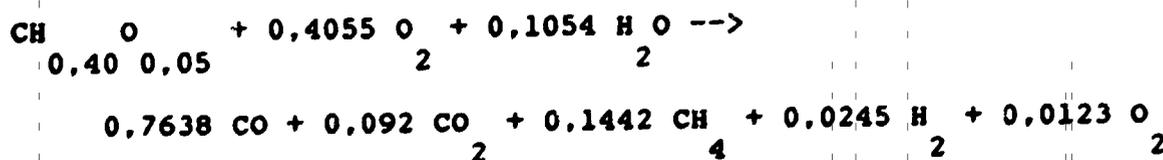
carbón de "fórmula mínima"  $\text{CH}_0$  (ver Tabla 3)  
0,415 0,056

composición del gas [3]: 24,9 % CO (en volumen)  
3,0 % CO<sub>2</sub>  
4,7 % CH<sub>4</sub>  
0,8 % H<sub>2</sub>  
0,4 % O<sub>2</sub>  
66,2 % N<sub>2</sub>

En este caso, es:

b = 0,7638  
c = 0,0920  
d = 0,1442  
e = 0,0245  
f = 0,0123  
g = 0,1054  
a = 0,4055

y la ecuación (1) queda como:



Esta ecuación está indicando un consumo de agua de 0,1054 moles por cada mol de carbón consumido; esa agua puede venir de la propia humedad del carbón (que en este caso sería de 12,5 % calculada sobre el carbón húmedo), de la humedad del aire, o de ambos, y si el contenido de humedad total es mayor, entonces el agua en exceso vá a aparecer junto con los productos, condensando

en las partes frías del sistema de purificación del gas. Inversamente, si la cantidad de agua es la estequiométrica, no habrá ocurrencia de agua entre los productos.

En realidad, la cuestión es más compleja, porque se trata de un sistema dinámico en que hay varios parámetros, y la variación de uno de ellos influye en el resultado global de la gasificación. Así, por ejemplo, variaciones del flujo de gas pueden provocar cambios en la temperatura, con la consiguiente variación de la composición de equilibrio del gas resultante. En forma general, un aumento de la T dentro del gasificador causa aumentos de las concentraciones de CO y de H<sub>2</sub>, y disminución de las de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, mientras que la de CH<sub>4</sub> primero aumenta levemente y después disminuye, yendo el C más para los óxidos que para el metano. Si la relación atómica H/O del combustible aumenta, entonces aumentan las concentraciones de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y disminuyen las de CO y CO<sub>2</sub>, mientras que la de agua primero aumenta y después disminuye, yendo el C más para el metano que para los óxidos. Si la presión en el gasificador aumenta, aumentan las concentraciones de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> y de H<sub>2</sub>O, y disminuyen las de CO e H<sub>2</sub>, aumentando también la temperatura. Por otro lado, la T en la zona de reacción tiende a aumentar cuando son menores la granulometría o la humedad del combustible [17,18].

El volumen de gas resultante puede ser calculado como:

$$V = 100 \frac{b \cdot RT}{\% \text{ CO} \cdot P} = 100 \frac{c \cdot RT}{\% \text{ CO}_2 \cdot P} = \dots \quad (10)$$

y en este caso es:

$$V = 68,7 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3$$

con lo cual se tiene:

$$\frac{68,7 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3}{(12 + 0,415 + 0,056 \cdot 16) \text{ g}} = 5,16 \text{ Nm}^3 / \text{kg carbón seco}$$

#### EJEMPLO 2: Gasificación de leña.

Supongase la situación siguiente:

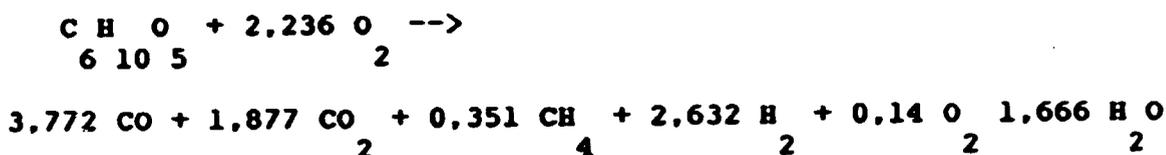
leña de "fórmula mínima" C H O  
6 10 5

composición del gas (datos de Loma Plata), % en volumen:

21,5 % CO	2,0 % CH <sub>4</sub>	0,8 % O <sub>2</sub>
10,7 % CO <sub>2</sub>	15,0 % H <sub>2</sub>	50,0 % N <sub>2</sub>

En este caso es:  $b = 3,772$   
 $c = 1,877$   
 $d = 0,351$   
 $e = 2,632$   
 $f = 0,140$   
 $g = -1,666$   
 $a = 2,236$

El hecho de  $g$  ser negativo quiere decir que el agua aparece entre los productos y no entre los reactivos, o sea, la ecuación (1) sería escrita así:



Quiere decir, en el caso de la gasificación de la madera hay producción neta de agua, diferente del caso del carbón, debido a los mayores contenidos (relativos) de O e H en la estructura molecular; esta es una de las razones por las cuales el sistema de purificación del gas es más crítico en el caso de la madera que en el del carbón (otra razón importante es que la madera tiene 70-80 % de volátiles, de los cuales 15-25 % son condensables orgánicos ("alquitrán"), mientras que en el carbón los volátiles son 15-25 % con poca cantidad de condensables).

El volumen de gas producido es:

$$V = 100 \frac{b \cdot RT}{\% CO_2 \cdot P} = 393,10 \text{ Nm}^3$$

con lo cual se tiene:

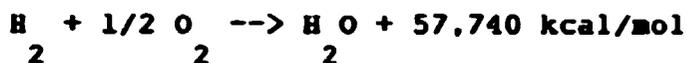
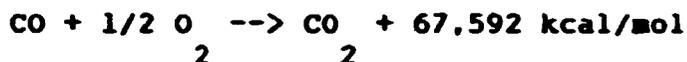
$$\frac{393,10 \text{ Nm}^3}{(72+10+80) \text{ g}} = 2,43 \text{ Nm}^3 / \text{kg leña seca}$$

El balance de energía es más complicado, en la medida en que deben ser consideradas la energía total entregada al proceso, y la energía resultante incluyendo la disipada al medio ambiente; o sea, la primera ley de la termodinámica dice que la energía total es conservada, y la segunda ley dice que una parte de la energía es transformada en calor (energía térmica) debido a la irreversibilidad del proceso. Así, la relación entre la energía "útil" obtenida y la energía total entregada da la eficiencia del proceso considerado.

De la ecuación (1) se puede calcular la parte correspondiente a la energía química, y hacer el balance entre lo que entra ( $\rightarrow E_q$ ) y lo que sale ( $E_q \rightarrow$ ). El criterio generalmente

adoptado es el de utilizar las entalpías de combustión y/o los poderes caloríficos de los compuestos de la reacción.

Adoptando los valores [17]:



se puede calcular la energía química (poder calorífico) del gas producido a partir de los correspondientes números de moles:

gas de:	carbón	madera
P.C.I. (kcal)	80,70	474,26
P.C.I. (kcal/Nm <sup>3</sup> )	1.174,6	1.206,7

La energía química del carbón y de la madera se miden por su poder calorífico superior, y en este caso adoptamos los valores (en base seca):

	carbón	madera
P.C.S. (kcal/kg)	6.700	4.500

Con estos valores y las correspondientes ecuaciones de balance de masa, el balance de la energía química queda así para los dos ejemplos considerados:

	->Eq(kcal)	Eq->(kcal)	Eq->/->Eq
gasif.carbón	89,18	80,70	0,905
gasif.madera	729,0	474,26	0,650

o sea, en la gasificación del carbón se recupera en los productos 90,5 % de la energía del carbón, y en la de la madera, se recupera 65 % de la energía que entró. Las eficiencias globales son diferentes, en la medida que las otras formas de energía (electricidad y calor entregados, recuperadores de calor, etc.) sean computadas; así, para diversos procesos de gasificación de maderas, se obtienen diferentes valores de la eficiencia: 80 % [6]; 78,4 % para el proceso Moore [11]; 65 % para leña con 30 % de humedad (y 75 % para carbón vegetal) [19]; 90 % [20].

Como ejemplo final, en recientes desarrollos de la PETROBRAS [21], para dos gasificadores (uno de flujo cruzado para carbón, y otro de flujo co-corriente para cáscara de ba-baçu) fueron obtenidos los siguientes balances:

a) Gasificador de carbón vegetal de flujo cruzado:

	->E (Gcal/h)	‡
carbón:	7,46	100
	E-> (Gcal/h)	‡
gas:	6,49	87,03
calor sensible:	0,52	6,95
pérdidas en el residuo:	0,01	0,12
otras pérdidas:	0,44	5,89

b) Gasificador de cáscaras de babaçu de flujo descendente:

	->E (Gcal/h)	‡
cáscaras:	4,95	100
	E-> (Gcal/h)	‡
gas:	3,71	74,88
calor sensible:	0,24	4,88
pérdidas en el residuo:	0,15	3,12
otras pérdidas:	0,85	17,18