

# Gasificación de biomasa. Introducción a la tecnología

DIEGO OÑATE ARRESTI. INGENIERO QUÍMICO.

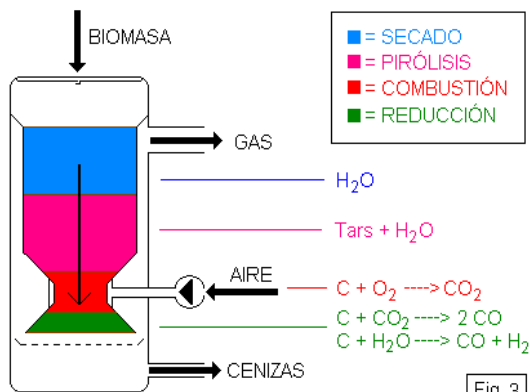


Fig. 3

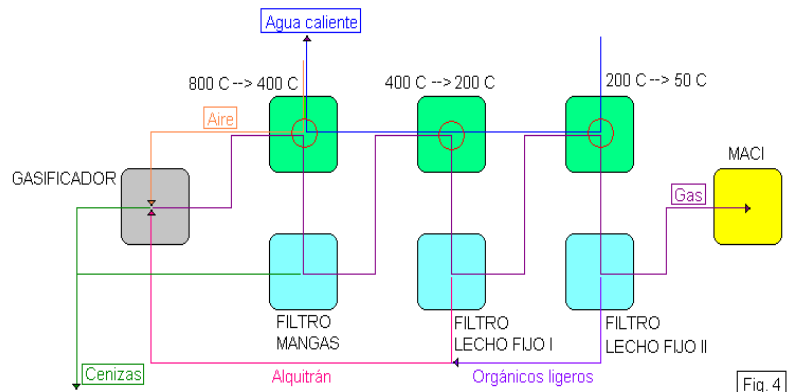


Fig. 4

La gasificación de biomasa es una tecnología que se presenta como novedosa en todas las ferias y publicaciones del sector. La realidad es bien distinta, es una tecnología que data de principios del siglo XX, donde fue empleada con éxito en los llamados “gasógenos” que no eran más que reactores (gasificadores) donde se gasificaban residuos de madera (astillas de frondosas, secas y de tamaño perfectamente homogéneo), acoplados a motores de combustión interna (MACI) de encendido provocado (bloque de fundición, atmosféricos, de bajas revoluciones y altas carreras del cilindro, sin electrónica de potencia). Figura 1 (original del año 1939):

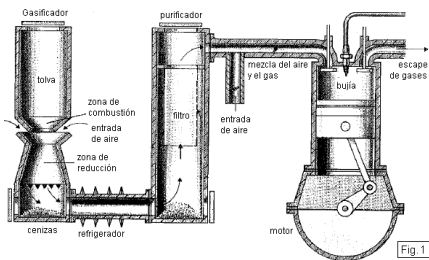


Fig. 1

Bajo esas condiciones, la gasificación fue una tecnología exitosa. Hoy en día, se quieren extrapolar los éxitos de aquella época, con combustibles muy diferentes (residuos herbáceos de agricultura, materiales húmedos y con cenizas), y con motores muy distintos (aleaciones ligeras, electrónicos, turboalimentados). Es en esa extrapolación donde se encierran los principales riesgos tecnológicos de la gasifica-

ción actual. En este artículo aprenderemos “cómo” debe implementarse una planta de gasificación de biomasa y las restricciones lógicas que una de estas posee por naturaleza y de las que difícilmente podremos escapar.

## Aspectos termoquímicos

La gasificación se define como la conversión termoquímica de un sólido carbonoso en un gas combustible, mediante una oxidación parcial a elevada temperatura.

De modo menos ortodoxo podríamos decir que la gasificación consiste en romper los carbohidratos que constituyen la materia vegetal, por medio de calor, formando moléculas gaseosas elementales como CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, junto con otras moléculas no elementales, en mucha menor cuantía, de fórmula molecular promedio CH<sub>1,2</sub>O<sub>0,5</sub>. Las primeras constituyen la práctica totalidad del volumen del gas y son las que se emplean con fines de generación eléctrica. Las segundas (“tars” o alquitranes) son vapores pesados condensables y por tanto deben ser eliminados de cara a poder obtener un gas limpio. Estos alquitranes, y su tendencia a condensar a bajas temperaturas (a partir de 400 C), formando un aceite espeso y adherente, constituyen uno de los principales escollos que plantea esta tecnología. A diferencia de los carbones, que poseen composiciones químicas muy diferentes según su tipología y origen, la biomasa (en base

seca y libre de cenizas) posee, independientemente de su carácter, aproximadamente una fórmula molecular promedio de CH<sub>1,4</sub>O<sub>0,6</sub> (Figura 2):

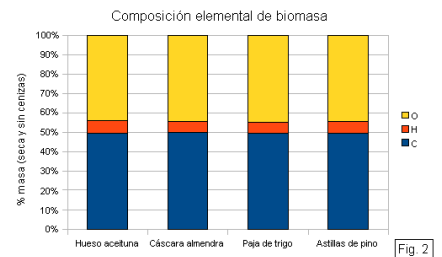
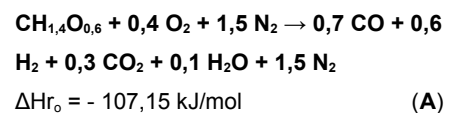
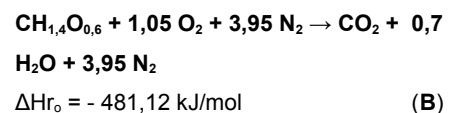


Fig. 2

La reacción teórica simplificada que se da en un proceso de gasificación consiste en:



Si se compara con la reacción de combustión completa estequiométrica:



Se puede apreciar como la cantidad de aire introducida en gasificación es un 38% al correspondiente para una combustión completa. Es por ello que el gas resultante no está agotado químicamente (como en el caso de la combustión), sino que posee constituyentes combustibles (CO, H<sub>2</sub>), junto con otros no combustibles (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O), formados por la combustión parcial de la biomasa para generar el calor de reacción

necesario. Atendiendo a la ecuación teórica, la composición del gas resultante (% en volumen) y su poder calorífico inferior (PCI) son los siguientes:

**CO = 21,87 %**

**H<sub>2</sub> = 18,75 %**

**CO<sub>2</sub> = 9,37 %**

**H<sub>2</sub>O = 3,12 %**

**N<sub>2</sub> = 46,89 %**

**PCI = 4800 kJ/Nm<sup>3</sup>**

En la práctica se formará también metano CH<sub>4</sub> (del orden de un 2%), por lo que el poder calorífico habitual del gas será del orden de 5500 kJ/Nm<sup>3</sup>.

El efecto de la humedad en la biomasa será siempre negativo, ya que el calor necesario para secar la misma será captado mediante la combustión parcial de biomasa adicional, por lo que aumentará la concentración de agentes químicos agotados (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) frente a los combustibles (CO e H<sub>2</sub>). Por ello siempre se empleará una biomasa lo más seca posible.

### **Tipos de gasificadores**

Existen diferentes modelos de gasificadores, muchos de ellos desarrollados a partir de la experiencia industrial en la gasificación de carbón (mucho menos problemática). Así tenemos reactores de lecho móvil, fluidizado y de alta presión. En este estudio trataremos el primer tipo, por ser el originalmente desarrollado y por ser el más adecuado hasta potencias de 500 kWe.

Este tipo de gasificador es muy sencillo (**Figura 3**), consta de un cilindro vertical donde la biomasa va reaccionado y descendiendo por gravedad. A lo largo de su trayectoria descendente, ésta sufre una serie de procesos físico-químicos, así primeramente sufre un secado, posteriormente y a partir de 300 C, comienza la pirólisis que es el desprendimiento de los compuestos volátiles (alquitranes) de los

que consta la biomasa, permaneciendo el carbono fijo bajo forma de carbón vegetal (char). A un tercio aproximadamente del fondo, existe un estrechamiento por donde se introduce el aire de gasificación, de esta manera se consigue un contacto íntimo entre la biomasa y el aire. Éste reacciona y combustiona parte del char y los alquitranes, generando calor para romper los compuestos pirolíticos en moléculas elementales "se craquean" y potenciar el conjunto de reacciones endotérmicas que tienen lugar (secado, pirólisis). Por último el char es reducido con CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O para formar CO e H<sub>2</sub>. Finalmente sólo quedan cenizas minerales que pueden ser empleadas como abono inorgánico.

### **Estrategia de acondicionamiento**

El gas resultante se encontrará a una temperatura del orden de 800 C, por lo que previo a su uso como agente combustible en un MACI será necesario enfriarlo hasta una temperatura adecuada a estas máquinas (menor de 50 C). Este enfriamiento no puede efectuarse en una sola etapa ya que el gas de gasificación posee alquitranes que a temperaturas inferiores a 400 C condensan. Además, el gas arrastrará cierta cantidad de cenizas volantes y partículas de char no reaccionadas, que junto con los alquitranes, formarían un "mortero" que rápidamente podría ensuciar e incluso taponar las conducciones de gas y dañar las partes móviles del MACI. Y por último, el gas contiene agua, tanto más cuanto más húmeda esté la biomasa, por lo que a bajas temperaturas se podría rebasar la temperatura de rocío y condensar agua junto a compuestos orgánicos ligeros (fenoles). Es por ello que la máxima a emplear en el enfriamiento del gas, será segregar primero las cenizas y char volantes, después condensar y reciclar al reactor los alquitranes pesados, y por último evitar la condensación de agua y reciclar

los posibles compuestos orgánicos ligeros formados. Por todo esto, la única solución es introducir una biomasa muy seca (menos del 10% de humedad), ya que de otro modo, la condensación combinada de agua y fenoles parcialmente solubles en ésta, constituirá un problema severo de cara a eliminar tales soluciones acuosas contaminantes. En la **Figura 4** se muestra un diagrama con la estrategia de proceso que se debe implementar.

### **Fases de acondicionamiento del gas**

La forma más sencilla de enfriar el gas es mediante transferencia de calor indirecta con agua en intercambiadores de carcasa y tubos (agua por carcasa). Hay que tener presente que si bien el calor sensible del gas caliente es una fuente de energía que se puede y debe aprovechar, en la práctica su utilidad energética no es muy grande (menos del 20% del PCI del gas).

#### **Fase I: enfriamiento 800 C → 400 C**

Es imperativo minimizar la formación de alquitranes en un gasificador. Estos se destruyen en la región de contacto entre la biomasa y el aire de gasificación, por lo que cuanto mayor sea la temperatura del aire entrante, menor será la formación de alquitranes, por ello se aprovechará primeramente el calor del gas para calentar indirectamente el aire de gasificación de forma que éste acceda a una temperatura de 400 C. Posteriormente, el gas será enfriado mediante intercambio con agua de refrigeración (hasta 400 C).

#### **Fase II: eliminación de sólidos**

A una temperatura de 400 C, y antes de que comience la condensación de alquitranes, deberemos eliminar las partículas sólidas en suspensión (cenizas y char) para evitar su mezcla con los alquitranes

en cuanto éstos comiencen a condensar. Para ello se empleará un filtro de mangas de alta temperatura (fibra cerámica).

### **Fase III: enfriamiento 400 C → 200 C**

Entre los 400 C y los 200 C condensarán una serie de compuestos orgánicos oxigenados, de fórmula molecular promedio igual a  $CH_{1,2}O_{0,5}$ . Para ello se incluirá un intercambiador con agua refrigerante, seguido de un lecho fijo de filtrado, que permita la segregación y decantación de las gotas de alquitrán condensado. En la bandeja de decantación, se incluirá una bomba y se permitirá el reciclo de los alquitranes al reactor (alimentándolos en un punto superior al estrechamiento), de esta forma se permitirá su nueva reacción y la posibilidad de que genere nuevos compuestos gaseosos combustibles.

### **Fase IV: enfriamiento 200 C → 50 C**

Una vez segregados los alquitranes, se permitirá el enfriamiento del gas hasta la temperatura de admisión al motor, pero se evitará rebasar la temperatura de rocío del gas, para ello como se ha comentado, sólo se admitirá biomasa muy seca.

Aún así es habitual la condensación de compuestos orgánicos ligeros, que si no son mezclados con agua pueden ser segregados y reciclados al gasificador.

Si por alguna razón (biomasa húmeda) se formara una disolución de agua con aquellos compuestos ligeros, esta tendría la consideración de residuo tóxico y peligroso, por que debería de tratarse como tal mediante un gestor autorizado de residuos, con el consiguiente coste derivado.

### **Fase V: combustión del gas en MACI**

La relación en volumen de aire de combustión y gas de gasificación es aproximadamente 1:1, es decir al motor se deberán

introducir iguales volúmenes de aire y gas (éstos motores habitualmente operan sin exceso de aire), mientras que la de los combustibles tradicionales es muy superior (10:1 para gas natural y 60:1 para gasolina) por lo que, aunque el PCI del gas es muy inferior al del gas natural o la gasolina, el PCI de la mezcla combustible – aire no será muy inferior (2750 kJ/Nm<sup>3</sup> para el gas frente a 4000 kJ/Nm<sup>3</sup> para el gas natural). De hecho, el gas natural y el gas de gasificación son bastante similares en cuanto a su baja velocidad de combustión (velocidad de llama) y relativamente alto octanaje. Por ello un motor convencional de gas (o incluso de gasolina) podrá operar con gas de gasificación, ajustando correctamente los ratios de carburación según se ha visto. Es esperable que un motor de gas natural operando con gas de gasificación vea disminuir su eficiencia térmica en un 10%, (aproximadamente del 40% hasta el 30%), por lo demás el motor operará sin ningún perjuicio importante, siempre y cuando el gas haya sido generado, enfriado y depurado según se ha indicado. Si no es así, las válvulas y la cámara de admisión del mismo se verán prontamente ensuciadas y se requerirán de continuas paradas, cuando no una avería grave.

### **Limitaciones de la tecnología**

Hemos visto de manera descriptiva “cómo” se debe implementar una planta de gasificación. Es ahora momento de hablar de sus limitaciones como tecnología. En primer lugar habrá que imponer un límite físico al tamaño de los gasificadores de lecho móvil. Un valor lógico es el equivalente a 500 kWe. El porqué es sencillo, hemos visto que el corazón de este tipo de gasificadores es el estrechamiento o garganta por donde es alimentado el aire. Pues bien, si este estrechamiento es muy grande (de cara a que logre un gran flujo

de gas), se pierde el íntimo contacto que es exigible en esta región para lograr destruir la mayor parte de los alquitranes generados, por lo que la presencia de éstos será grande y por tanto los posteriores sistemas de limpieza del gas (pensados para eliminar pequeñas cantidades) no funcionarán como es debido.

Otra restricción se da en el tipo de combustible a gasificar, hemos visto al comienzo del artículo que las astillas empleadas en los antiguos gasógenos eran de tamaño homogéneo, secas y de maderas duras. Este elemento era tan importante, que pronto surgieron en la época empresas suministradoras de tales combustibles estandarizados, de manera que se garantizaba su calidad. Hay que tener en cuenta que la circulación de sólidos en el gasificador es por gravedad, por lo que cualquier elemento discordante (en tamaño, características, etc.) provocará canales preferentes de circulación del gas “bypass” rompiéndose la estratificación necesaria para una buena generación de gas.

En la actualidad se quiere emplear en gasificación elementos residuales de actividades agrícolas como paja de cereal o residuos de operaciones selvícolas (desbrozados). Estos combustibles encierran por si mismos numerosos riesgos en gasificación. En primer lugar pensemos que no son materiales densos y además su densidad no es uniforme. Ésta se puede uniformizar mediante operaciones de pelletizado (mecánico - térmico y con uso de aglutinantes) pero nunca será tan uniforme como la de una astilla perfectamente cúbica de madera densa. Otro problema importante, es la presencia de cenizas, y lo que es peor, la temperatura de fusión de éstas. Pensemos en una operación de desbrozado de montes para limpieza de caminos y cortafuegos contra incendios. Se recolectará madera de calidad de talas, pero también pequeños arbustos y sobre todo abundante tierra. Podemos pen-

sar en operaciones físicas de depuración de tales residuos (cribados, operaciones de flotación etc.) pero de todos modos nunca tendremos un combustible totalmente limpio y uniforme

El tema de la temperatura de fusión de cenizas es con mucho el problema de peor resolución. La paja de cereal contiene abundante cantidad de cenizas (más del 10%) principalmente constituida por sílice (SiO<sub>2</sub>). Este compuesto por sí sólo tiene una temperatura de fusión de 1700 C, nada que temer en un gasificador que nunca supera los 1200 C (en el punto de entrada de aire). El problema es que además de sílice, existen otras cenizas minerales en menor cuantía como óxidos alcalinos (K<sub>2</sub>O). Estos compuestos son bien conocidos en la industria del vidrio por actuar como fundentes y rebajar varios cientos de grados la temperatura de fusión de la sílice. Este factor beneficioso para el vidrio, se torna perjudicial para los gasificadores, ya que una ceniza que funde a menos de 1200 C es problemática, porque formará escorias minerales que conforme vayan creciendo irán ocluyendo la natural circulación de sólidos.

En la siguiente **Figura 5** se muestra, para los combustibles de la **Figura 2**, la apreciable diferencia en el contenido de cenizas y por ello la distinta idoneidad de unos frente a otros:

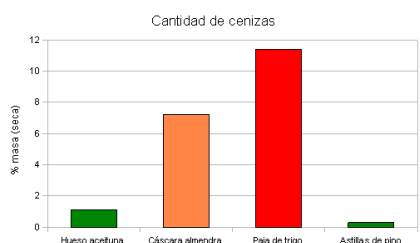


Fig. 5

A modo de resumen podemos decir que la gasificación de biomasa constituye una tecnología probada y de bajo riesgo tecnológico cuando la misma va unida con combustibles "nobles", como hemos visto

estos son las maderas densas (roble, haya, pino) de tamaño perfectamente regular y secas. Este combustible se puede obtener de una manera abundante y barata, con madera de palets secos y limpios, astillada y cribada rigurosamente. Bajo este supuesto, la gasificación es segura. Cualquier otro combustible distinto de este, exigirá de una experimentación de cara a estudiar su comportamiento y por lo tanto es una tecnología que presenta riesgos. En la próxima feria a la que acudamos, cuando nos digan aquello de: "¡Nuestro gasificador gasifica todo!", tendremos algo que decir...

### Dimensionado básico

A modo de ejemplo, efectuaremos un análisis básico de dimensionado de una planta de gasificación para accionar un MACI de gas natural (estequiométrico). El motor posee una potencia nominal de generación eléctrica de 500 kWe, con una eficiencia del 40%. La cogeneración de calor es de 600 kWt. La potencia térmica de gas natural es de 1250 kWt. Consideraremos un PCI del gas de 5500 kJ/Nm<sup>3</sup> con carburación 1:1. Si queremos mantener la misma potencia térmica de combustión y debido al menor PCI del gas, se perderá aproximadamente un 10% de eficiencia térmica, por lo que la potencia eléctrica generada será de 375 kWe. La cantidad de gas necesaria será de 820 Nm<sup>3</sup>/h. A partir de la ecuación A, podemos inferir una serie de ratios teóricos de balance:



La cantidad teórica de biomasa combustible (seca y libre de cenizas) será de 265 kg. Teóricamente la producción eléctrica será de 1,4 kWe / kg biomasa. En la práctica, teniendo en cuenta rendimientos no considerados en la reacción A (calor de secado de biomasa, pérdidas térmicas,

etc.), podremos considerar un ratio más real de 1 kWe / kg de biomasa. Por último, mencionar que el dimensionado físico del gasificador se hará en función del diámetro de la garganta y que ésta se dimensiona a partir de un ratio empírico de 0,9 Nm<sup>3</sup>/h·cm<sup>2</sup>, por lo que la garganta necesaria será de 911 cm<sup>2</sup> (34 cm de diámetro).

### Estudio económico

La planta de gasificación deberá producir 375 kWe que serán exportados a la red pública durante 8000 horas anuales. La retribución eléctrica según RD 661/2007 (actualizada a 01/2011) es 0,1002 €/kWh, considerando una biomasa de palets de madera (subgrupo b.8.2). El consumo de biomasa será de 385 kg/h y su precio, el de la bolsa de subproductos de madera de trituración: 0,025 €/kg. No se hará uso del calor de cogeneración. La inversión en la planta de gasificación será de 1500 €/kWe. Los costes de operación y mantenimiento se estiman en 0,01 €/kWh. La vida útil es 15 años. Se supone amortización lineal y fondos propios de inversión.

$$\text{INGRESOS} = 375 \times 8.000 \times 0,1002 = 300.600 \text{ €}$$

$$\text{GASTOS} = 385 \times 8.000 \times 0,025 + 375 \times 8.000 \times 0,01 = 107.000 \text{ €}$$

$$\text{MARGEN BRUTO} = 300.600 - 107.000 = 193.600 \text{ €}$$

$$\text{INVERSIÓN} = 1.500 \times 375 = 562.500 \text{ €}$$

$$\text{PAY-BACK} = 562.500 / 193.600 = 2,9 \text{ año}$$

$$\text{RENTABILIDAD} = 100 \times (193.600 - 562.500 / 15) / 562.500 = 27,75 \%$$

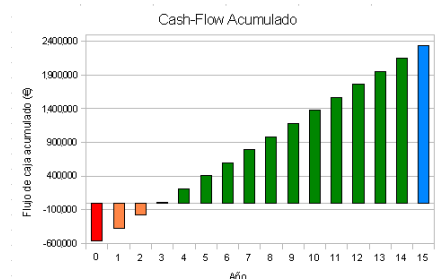


Fig. 6