

## **DISEÑO DE UNA PLANTA EXPERIMENTAL PARA GASIFICACIÓN DE MATERIA VEGETAL**

**Marta Díaz García<sup>[\*]</sup>, Francisco Javier Fernández García<sup>[\*\*]</sup>**  
[\*] Alumno; [\*\*] Tutor  
[uo189246@uniovi.es](mailto:uo189246@uniovi.es)

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

### **RESUMEN**

En este trabajo se expone una posible solución para crear una planta a escala de laboratorio para poder estudiar la obtención de energía a partir de biomasa y en el caso de ser factible, poder abastecer de electricidad zonas remotas de Colombia.

Se ha realizado un diseño preliminar de la planta basado en cálculos de las corrientes de reactivos y productos con una selección de equipos sobre una potencia base.

Se ha optado por un gasificador tipo downdraft, como equipo principal, ya que es el que produce menos alquitrán y tiene el diseño más adecuado para el rango de potencias típico de una planta experimental. En él se introduce la biomasa con un aporte de aire y se producen gases combustibles.

Además se necesitarán otro tipo de equipos como sensores de aire y de presión, reguladores de caudal, o un analizador de los gases generados. También será necesario un sistema de adquisición de datos.

Se ha estimado un presupuesto, según los equipos ofertados por distintos fabricantes y se ha calculado que la planta costaría 75769,13 Euros.

### **ABSTRACT**

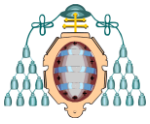
This paper exposes a possible solution to create a laboratory scale plant to study the energy generation from biomass, and if possible, to supply electricity to remote zones of Colombia.

A preliminary design of the plant has been performed based on calculations of the currents of reactivos and products and a selection of equipments on a power base.

The main selected equipment is a downdraft gasifier. This gasifier design has been selected due to the low tar content in the produced gas. Besides, it is the most appropriate design for the typical range of powers in this kind of experimental plant. In this gasifier, the biomass is introduced with an air current and combustible gas is produced.

In addition, another kind of equipments will be required as air mass flow sensors and regulators, pressure meters, or gas analyzer. A data register will also be necessary.

A budget has been estimated, according to the equipments offered by different companies that has been calculated with a cost of 75769,13 Euros.



## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, cada vez es más necesario encontrar fuentes de energía alternativas, debido al uso creciente de la misma y al agotamiento de los recursos naturales utilizados para su obtención.

La biomasa es un subproducto económico de la agricultura, con bajo contenido en azufre y cenizas y que no aumenta el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera y por tanto, apenas contribuye al efecto invernadero.

En este trabajo se busca el aprovechamiento de los residuos de biomasa en una zona de Colombia donde emplean un tipo de bambú, la Guadua, para múltiples aplicaciones, debido a que gracias a esto se podría generar energía para crear una red local eléctrica en zonas remotas.

Debido al aumento de temperaturas producidas por la actividad humana en la tierra, algunos países asumieron compromisos para reducir sus emisiones en lo que se refiere a los gases de efecto invernadero, todo esto se recoge en el denominado Protocolo de Kioto. Colombia pertenece a este grupo desde el 30 de Noviembre de 2001 y entró en vigor el 16 de Febrero de 2005, por su parte España firmó el acuerdo el 29 de Abril de 1998, lo ratificó el 31 de Mayo de 2002 y entró en vigor el 16 de Febrero de 2005. [1]

En Europa existe interés en el cumplimiento del objetivo 20-20-20, consistente en disminuir un 20% las emisiones de los gases de efecto invernadero, aumentar un 20% el uso de energías renovables y reducir otro 20% el consumo de energía primaria, por lo que este proyecto resulta interesante de cara al diseño de una planta experimental para llevar a cabo la gasificación de cualquier tipo de biomasa en España.

La Guadua es un material barato, fácil de obtener y con unas características físicas idóneas. Para su desarrollo se necesitan suelos sueltos, fértiles, con mediana profundidad, húmedos pero no inundables. Se desarrolla bien en suelos derivados de cenizas volcánicas y aluviales, especialmente suelos areno-limosos y arcillo-

limosos de color amarillo o amarillo-rojizo. El rango de temperaturas óptimo para su crecimiento es entre 20 y 26°C, el promedio mínimo de precipitación debe ser entre 1300mm, y 5000mm, y una humedad relativa del 80%. [2]

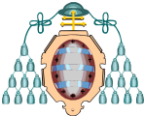
Actualmente, la Guadua se está utilizando con éxito en la arquitectura local. A partir de ella se pueden hacer estructuras como kioscos, muebles, suelos... Un conocido arquitecto, Simón Vélez, ha llegado incluso a construir una iglesia con este material.

Se pueden aprovechar los residuos de biomasa producidos al realizar estas construcciones mediante una valorización energética, para obtener energía para el uso de los habitantes de la región.

Se plantea como objetivo general llevar a cabo una investigación sobre el potencial aprovechamiento energético de los residuos, para ello será necesaria una planta experimental, por lo que el objetivo de este trabajo fin de master será realizar un diseño preliminar que contemple todos los elementos necesarios para su puesta en marcha.

Relacionado con estos temas en 1994, A.V. Bridgwater hizo un estudio sobre la fiabilidad técnica y económica de la gasificación de la biomasa para generar energía [3]. En 2014 Lydia Fryda, Claudia Daza, Jan Pels, Arno Janssen y Robin Zwart hicieron un estudio a escala de laboratorio sobre la combustión de especies de bambú vírgenes y torrefactadas de Guadua Angustifolia Kunth como sustitutivo de combustible en plantas energéticas de carbón [4].

Por otro lado, la gasificación de la biomasa ya había sido empleada durante la Segunda Guerra Mundial, en coches, botes, camiones, trenes y generadores eléctricos en Europa. Al finalizar la guerra, la gasolina comenzó a resultar asequible y la gasificación de biomasa cayó en el olvido.



En la crisis del petróleo, donde su precio era alto y había escasez de combustibles, la gasificación volvió a tomar relevancia.

**OBTENCIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LA BIOMASA**

Existen diferentes opciones para llevar a cabo la conversión de biomasa, de una manera bioquímica (digestión o fermentación) o de una manera termoquímica (pirólisis, gasificación, licuefacción o combustión).

Entre estas opciones se opta por la gasificación porque gracias a ella se obtiene un gas que se puede usar solo o combinado con el gas natural para producir energía, bien sea térmica en calderas, eléctrica y térmica en cogeneración o eléctrica en turbinas de gas en ciclos simples o combinados.

**LA GASIFICACIÓN**

La gasificación es la conversión de un sólido o líquido en una mezcla combustible, mediante una oxidación parcial, que puede ser quemada para liberar la energía o usada para la producción de productos químicos con valor añadido.

Para llevarla a cabo se requiere de un medio de gasificación como el vapor, el aire o el oxígeno, pero usar vapor puede hacer que se añada hidrógeno al producto. El oxígeno se puede suministrar al gasificador en forma de compuesto puro o inyectando aire, por lo que se ha elegido el aire como medio de gasificación.

En la figura 1 se puede ver un diagrama ternario con el que se puede saber que productos se formarían en el gasificador en función de las proporciones de carbono, de hidrógeno y de oxígeno de la mezcla.

Procesos de Gasificación para convertir combustibles sólidos a gaseosos:

- O: Proceso del oxígeno
- S: Proceso del vapor
- H: Proceso del hidrógeno
- P: Proceso de Pirólisis lenta
- F: Proceso de la pirólisis rápida

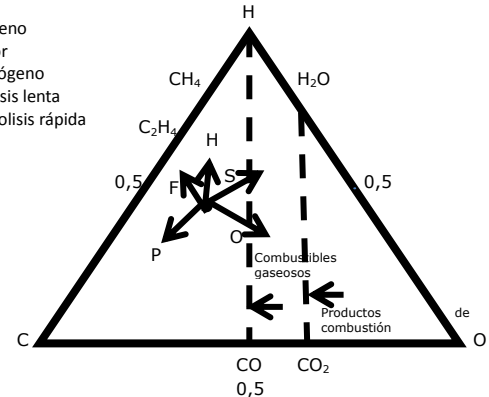


Figura 1. Diagrama ternario C-H-O para el proceso de gasificación de la biomasa

En las esquinas del triángulo se representan el oxígeno, el carbono y el hidrogeno puros, es decir con una concentración del 100%, mientras que en los lados del triángulo estarían los compuestos con distintas proporciones Carbono-Hidrógeno, Hidrógeno-Oxígeno y Carbono-Oxígeno, es decir, las mezclas binarias. Los puntos de dentro del triángulo representan las distintas mezclas ternarias entre el carbono, el hidrógeno y el oxígeno. En la figura 2 se pueden ver las distintas mezclas ternarias que se pueden formar.

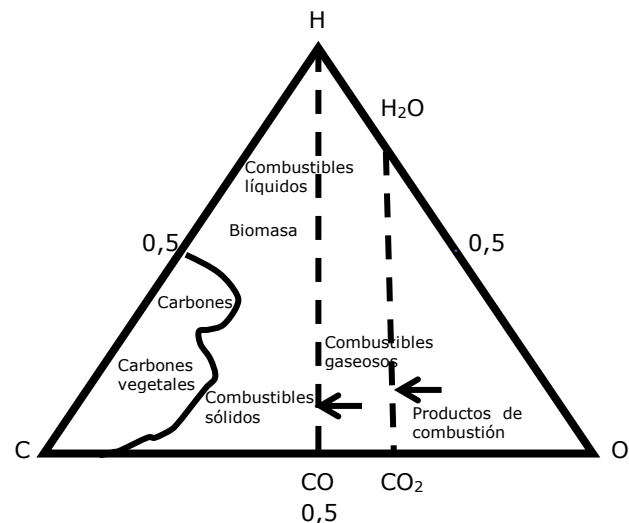
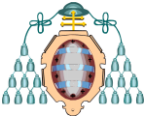


Figura 2. Mezclas ternarias del diagrama ternario C-H-O para el proceso de gasificación de la biomasa



En ellas se puede ver como los carbones tienen mayor proporción de carbono e hidrógeno que de oxígeno. Por ejemplo, la antracita que es la que tiene un contenido más alto en carbón se situaría hacia la esquina del carbono. En cuanto a la biomasa, tiene mayor proporción de hidrógeno que de carbono al contrario que los carbones.

Como ya se ha dicho antes, se puede representar en este diagrama el proceso de conversión. Como se puede ver en la figura 1, la pirólisis lenta lleva a la formación de carbón vegetal sólido lo que mueve el producto hacia la esquina del carbono, la pirólisis rápida lo mueve hacia el hidrógeno y lejos del oxígeno, lo que implica que será un combustible líquido. La gasificación con oxígeno mueve el producto de gas hacia la esquina del oxígeno, mientras que la gasificación con vapor se lleva el proceso hacia la esquina del carbono. El proceso de hidrogenación aumenta la proporción de hidrógeno en el compuesto por lo que mueve el producto hacia la esquina del hidrógeno.

### Reacciones que se llevan a cabo en el gasificador

El primer paso del proceso sería calentar la biomasa para eliminar la humedad (secado) para a continuación someterla a una degradación térmica o pirólisis. Los productos de la pirólisis (p. ej., el gas, sólido, y el líquido) reaccionan entre sí, así como con el medio de gasificación para formar el producto de gasificación final. En la siguiente figura se puede ver un esquema de estos procesos:

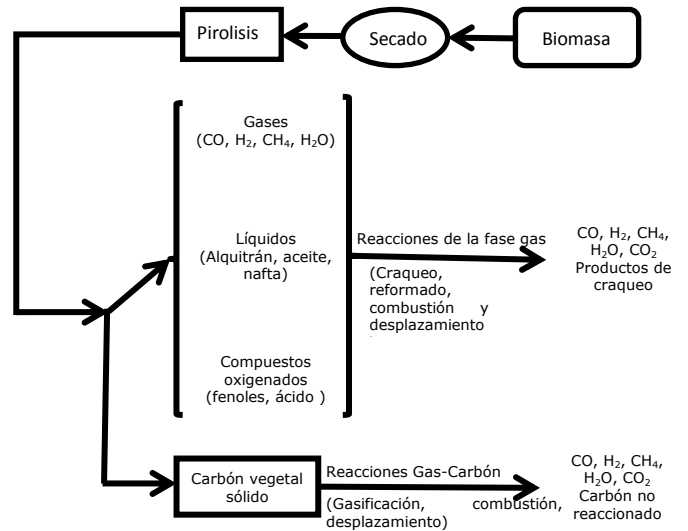
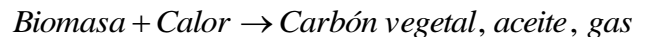


Figura 3. Secuencia de procesos y reacciones producidos en la gasificación

De manera general, la biomasa se verá envuelta en parte o completamente en los siguientes procesos:

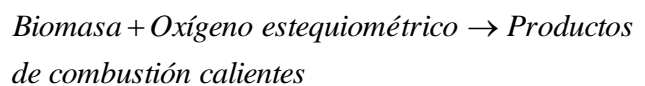
- Pirólisis:



- Gasificación:

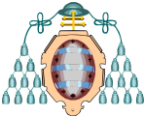


- Combustión:



Estos procesos térmicos tienen altos rendimientos y pueden, en principio, operar con cualquier tipo de biomasa, sin embargo, los procesos biológicos solo operan con alguno de los componentes de la biomasa, normalmente la celulosa.

Los polímeros de biomasa de cadenas largas tienen un ratio atómico relativamente constante  $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$  (Los ratios pueden variar ligeramente según las especies). [7]



### La Pirólisis de la biomasa

La pirólisis es la ruptura (lysis) de un material aplicando calor (pyro). Cuando la biomasa se calienta en ausencia de aire a una temperatura aproximadamente de 350°C (pirólisis), se forma carbón vegetal (símbolo químico: C), gases (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) y vapores de alquitrán (CH<sub>1,2</sub>O<sub>0,5</sub>). Los vapores de alquitrán son gases a la temperatura de pirólisis pero condensan para formar un humo con finas gotas de alquitrán.

En la figura 4 se representan los procesos que se desarrollan en la pirólisis, la gasificación, y la combustión. En ella, se ve como la pirólisis se produce debido al calor generado por la llama. A medida que la temperatura va aumentando se van produciendo los distintos procesos. Al llegar a un determinado punto, el carbón vegetal puede o no seguir quemándose (algunas cerillas son tratadas químicamente para impedir que el carbón vegetal arda). Cuando la llama se apaga, la madera que queda sigue sufriendo una pirólisis residual, generando un humo visible formado por gotitas de alquitrán condensadas.

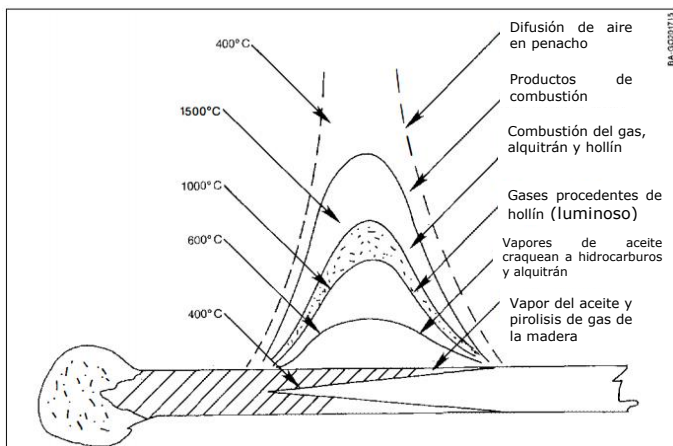
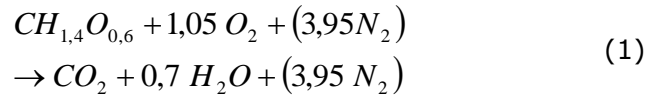


Figura 4. Pirólisis, gasificación, y combustión en la cerilla

### La Combustión de la biomasa

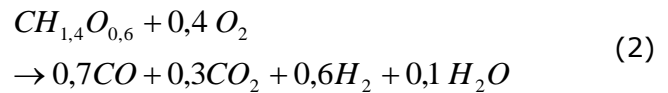
La combustión de biomasa es más compleja que la pirólisis o que la gasificación, su reacción global se puede representar, de una forma simplificada, de la siguiente manera:



donde CH<sub>1,4</sub>O<sub>0,6</sub> es una fórmula típica de la biomasa. Se escribe el nitrógeno entre paréntesis porque es un inerte.

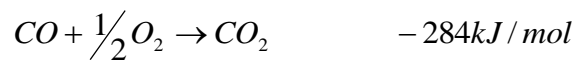
### Las Reacciones de Gasificación

La reacción de gasificación se lleva a cabo con un exceso de oxígeno produciendo algo de CO<sub>2</sub> y agua, para mover la reacción hacia la esquina del oxígeno (figura 2):



Las reacciones parciales más importantes producidas en el gasificador serán.

- Las reacciones de combustión:



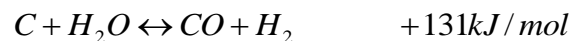
- Reacción de formación del agua:



- La reacción de Boudouard:

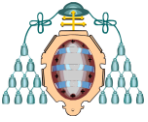


- La reacción gas-agua:



- La reacción de metanización:





## Tipos de gasificadores

Los gasificadores se clasifican según el modo de contacto y el medio de gasificación. Basándose en el contacto gas-sólido los gasificadores se dividen en tres tipos:

- Lecho fijo
- Lecho fluidizado
- Lecho de flujo arrastrado

Este proyecto está pensado para una planta experimental por lo que se usará un gasificador del tipo lecho fijo cuyo diseño es el más adecuado para bajas potencias.

Dentro de los gasificadores de lecho fijo se pueden considerar tres tipos el downdraft, el crossdraft y el updraft.

El rango de trabajo de un gasificador Downdraft está entre los 10kW y 1MW, mientras que el Updraft está entre los 3MW y los 11MW aproximadamente, por lo que se optará por el Downdraft.

### El gasificador Downdraft

El gasificador Downdraft es un reactor equicorriente donde el aire se pone en contacto con la biomasa pirolizada antes de que sea alimentada a una llama similar a la llama que es generada por la cerilla en la figura 4. El gas fluye hacia abajo (por esto se llama downdraft el equipo) y sale por la parte inferior del gasificador, después de haber atravesado un lecho de ceniza caliente. Esto ocurre en la zona de alta temperatura por lo que el alquitrán encuentra condiciones favorables para romperse. Por esta razón, el gasificador Downdraft, tiene la tasa de producción de alquitrán más baja entre todos los reactores de este tipo. Estos reactores se usan mucho para motores de combustión interna ya que necesitan un gas más limpio (con bajo contenido en alquitranes). La ceniza producida sale con el gas, y se deposita en el fondo del reactor.

Un gasificador downdraft requiere menos tiempo (20 - 30 minutos), para arrancar y poner la planta a la temperatura de funcionamiento, que el requerido por un gasificador updraft. Además, funciona mejor con combustible de pelletizado, con humedades que no exceden el 25 %, y tiene una alta eficacia en la gasificación debido a la alta temperatura de salida de los gases. Hay dos tipos principales de gasificador downdraft:

- El gasificador "throatless".

Se caracteriza porque la parte superior está abierta a la atmósfera, y no hay ningún estrechamiento en el tanque del gasificador, por lo que se ha decidido realizar el proyecto con el otro equipo:

- El gasificador "throated"

El objetivo del estrechamiento del gasificador es para la zona de oxidación (la combustión) ya que así, se fuerza a que todo el gas de pirólisis pase por ahí. El aire se inyecta por encima del estrechamiento. En la figura 5 se muestra un esquema de este tipo de reactor.

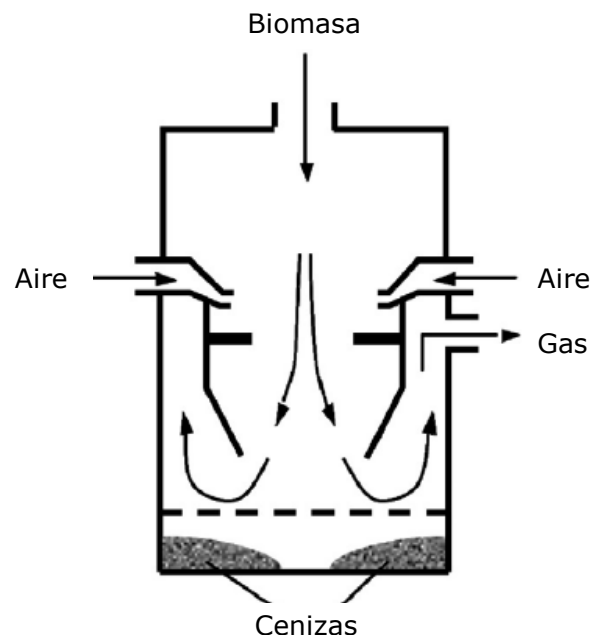
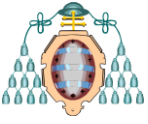


Figura 5. Gasificador Downdraft (tipo Imbert).



## DIMENSIONADO PRELIMINAR

A continuación se realizará un dimensionado preliminar del gasificador cuantificando las composiciones y los flujos de entrada y salida en el mismo para poder elegir dimensionar los equipos posteriormente.

Para obtener los flujos de aire a la entrada, los de los gases de combustión a la salida y la biomasa entrante, se toma una composición general de biomasa cuya fórmula será:  $CH_{1,4}O_{0,6}$ . Los datos característicos de este compuesto se han obtenido de la referencia 7 y se pueden ver en las tablas siguientes:

Tabla 1. Composiciones en % en peso y en % en moles de una biomasa típica [9]

|                               | <b>C</b> | <b>H</b> | <b>O</b> |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Composición (%en peso)</b> | 52,2     | 4,3      | 41,7     |
| <b>Composición (%moles)</b>   | 33,3     | 46,7     | 20       |

Tabla 2. Valores de la densidad, del Poder Calorífico Superior y el Inferior de una biomasa típica [9]

|                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| <b>PCS</b>      | 20900 kJ/kg           |
| <b>PCI</b>      | 20400 kJ/kg           |
| <b>Densidad</b> | 256 kg/m <sup>3</sup> |

Se dimensionará el gasificador en función de la potencia térmica que se puede obtener de los productos de la gasificación por unidad de biomasa introducida. Se conoce el PCI que se asigna a la combustión, por lo que se puede obtener el calor de formación de la biomasa y en base a eso se obtiene el calor necesario para llevar a cabo la gasificación.

### Obtención del calor de formación de la biomasa

Para hallar el calor necesario para llevar a cabo la gasificación de la biomasa se precisa conocer el calor de formación de la biomasa, por lo que se hará un análisis de los calores de

formación de reactivos y productos de la reacción global (1) de la combustión.

La combustión produce un calor equivalente al Poder Calorífico Superior cuando la temperatura de combustión de los productos es baja, lo que produciría agua líquida. Normalmente, el máximo calor generado correspondería al Poder Calorífico Inferior ya que el agua se encuentra en fase vapor en los gases de combustión.

El primer paso será calcular el calor de formación de la biomasa, para ello, es necesario conocer los calores de formación del resto de reactivos y productos:

Tabla 3. Calores de formación de reactivos y productos de la reacción de combustión [10]

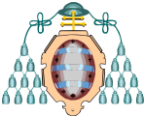
|                           | <b>AH<sup>0</sup><sub>f</sub> (kJ/kmol)</b> |
|---------------------------|---|
| <b>O<sub>2</sub></b>      | 0   |
| <b>N<sub>2</sub></b>      | 0   |
| <b>CO<sub>2</sub></b>     | -393137,36                                  |
| <b>H<sub>2</sub>O (v)</b> | -241595,64                                  |

Según la reacción de combustión, el poder calorífico inferior sería igual a:

$$PCI = \Delta H_{BIOMASA}^0 + 1,05\Delta H_{O_2}^0 + 3,95\Delta H_{N_2}^0 - \Delta H_{CO_2}^0 - 0,7\Delta H_{H_2O}^0 - 3,95\Delta H_{N_2}^0 \quad (1)$$

Por lo que despejando se obtiene el calor de formación de la biomasa que será:

$$\Delta H_{BIOMASA}^0 = -93054,31 \text{ kJ / kmol}$$



### Obtención del calor necesario para llevar a cabo la gasificación de la biomasa

Centrándose en la reacción global (2) de la gasificación, se puede calcular el calor necesario para llevar a cabo la gasificación.

Para ello, hay que saber los calores de formación de los reactivos y los productos de la reacción:

Tabla 4. Calores de formación de reactivos y productos de la reacción de gasificación [10]

|                           | $\Delta H_f^0$<br>(kJ/kmol) |
|---------------------------|-----------------------------|
| <b>Biomasa</b>            | -93054,31                   |
| <b>O<sub>2</sub></b>      | 0                           |
| <b>CO</b>                 | -110418,88                  |
| <b>CO<sub>2</sub></b>     | -393137,36                  |
| <b>H<sub>2</sub></b>      | 0                           |
| <b>H<sub>2</sub>O (v)</b> | -241595,64                  |

Donde el calor necesario sería:

$$Q = \Delta H_{BIOMASA}^0 + 0,4\Delta H_{O_2}^0 - 0,7\Delta H_{CO}^0 - 0,3\Delta H_{CO_2}^0 - 0,1\Delta H_{H_2O}^0 - 0,6\Delta H_{H_2}^0 \quad (2)$$

Sustituyendo los valores se obtendrá un valor de:

$$Q = 126339,68 \frac{kJ}{kmol \text{ Biomasa}}$$

### Cálculo del calor de combustión de los productos

El calor de combustión de los productos será la diferencia entre el Poder Calorífico Inferior y el calor necesario para que se produzca la gasificación:

$$\Delta H_{COMBUSTIÓNPRODUCTOS}^0 = PCI - Q = 342860,32 \frac{kJ}{kmol} \quad (3)$$

$$\Delta H_{COMBUSTIÓNPRODUCTOS}^0 = 14906,97 \frac{kJ}{kg \text{ Biomasa}}$$

### Cálculo de las composiciones de los productos de la reacción de gasificación

Según la reacción de gasificación, teniendo en cuenta el nitrógeno, se tendrían 3,1 kmol Gas en base seca en los productos de la reacción, en la siguiente proporción:

Tabla 5. Composiciones de los productos de la reacción de gasificación

|                       | Productos en la reacción | Tanto por uno en peso | % en peso |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------|
| <b>CO</b>             | 0,7                      | 0,225                 | 22,55     |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 0,3                      | 0,097                 | 9,66      |
| <b>H<sub>2</sub></b>  | 0,6                      | 0,193                 | 19,33     |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | 1,50                     | 0,485                 | 48,47     |
| <b>SUMA</b>           | 3,10                     | SUMA                  | 100,00    |

### Obtención de los flujos de biomasa, aire de combustión que entran y gases de combustión que salen

A continuación, se detallará el cálculo de los flujos de biomasa, aire de combustión y biomasa:



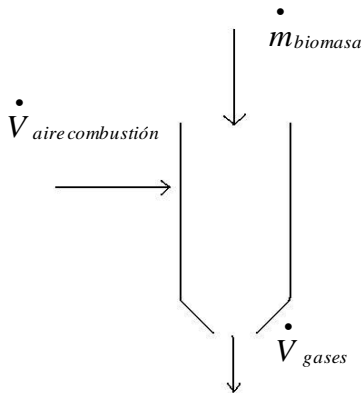
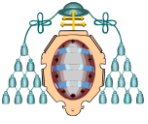


Figura 6. Esquema de los flujos de entrada y salida en el gasificador

Se toma como base de cálculo 1kW y se calculan los caudales de aire, gases de la combustión y biomasa serían:

$$P = m_{Biomasa} \Delta H^0_{COMBUSTIÓNPRODUCTOS} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{Biomasa} = 2,92 \cdot 10^{-6} \frac{kmol Biomasa}{s} = 2,41 \cdot 10^{-1} \frac{kgBiomasa}{h}$$

Dividiendo por la densidad se obtendría el caudal volumétrico de biomasa a introducir en el reactor:

$$\dot{V}_{Biomasa} = 9,43 \cdot 10^{-4} \frac{m^3 Biomasa}{h}$$

Siguiendo la estequiometría de la reacción se obtienen los caudales de gases y del aire de combustión:

$$\dot{V}_{Gas} = 7,3 \cdot 10^{-1} \frac{Nm^3 Gas}{h}$$

$$\dot{V}_{Aire} = 4,46 \cdot 10^{-1} \frac{Nm^3 Aire}{h}$$

## SELECCIÓN DE EQUIPOS

Se ha procedido a la elección de equipos de distintas casas comerciales, para posteriormente estimar el precio del diseño de la planta

experimental de gasificación. Dichos equipos se muestran a continuación:

## El gasificador

El gasificador propuesto se llama Gasificador GEK. Este equipo incluye el reactor GEK v5.0, la tolva, el ciclón, un sistema de filtrado, el sistema de mezcla de gas/aire con el sensor O<sub>2</sub>, y el sistema de automatización PCU. Sus características de funcionamiento son las siguientes:

Tabla 6. Características de funcionamiento del gasificador GEK ofertado por All Power Labs. [11]

|   |   |
|---|---|
| <b>Máximo flujo de gas</b>                    | 60m <sup>3</sup> /h   |
| <b>Mínimo flujo de gas</b>                    | 10m <sup>3</sup> /h   |
| <b>Composición Gas</b>                        | CO:22% H <sub>2</sub> :20%<br>CH <sub>4</sub> :3% CO <sub>2</sub> :10%<br>N <sub>2</sub> :45% |
| <b>Máximo tiempo de operación en continuo</b> | Aprox. 12h  |
| <b>Tiempo de arranque</b>                     | 5-20 min.   |

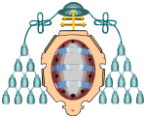
Como se puede ver la composición del gas de salida coincide con la calculada, sin embargo, requiere un flujo de gas mayor por lo que se calculará para una potencia mayor, por ejemplo de 20kW. Los caudales obtenidos tendrán unos valores de:

$$\dot{m}_{Biomasa} = 5,83 \cdot 10^{-5} \frac{kmol Biomasa}{s} = 4,82 \frac{kgBiomasa}{h}$$

$$\dot{V}_{Biomasa} = 18,87 \cdot 10^{-3} \frac{m^3 Biomasa}{h}$$

$$\dot{V}_{Gas} = 14,55 \frac{Nm^3 Gas}{h}$$

$$\dot{V}_{Aire} = 8,92 \frac{Nm^3 Aire}{h}$$



## Caudalímetro de aire

En el gasificador Downdraft, el aire se inyecta en la interfase entre la biomasa entrante y el carbón vegetal. Si se produce demasiado carbón vegetal, el aire consume antes el exceso de carbón vegetal que la biomasa; por el contrario, si no hay carbón vegetal, se consume la biomasa. Por esto, el gasificador Imbert es autorregulable.

El control de reacción se realizará mediante un regulador de caudal de aire, con el que se introducirá el flujo calculado para 20kW y el motor de la tolva se regulará de forma manual para mantener un nivel de biomasa en el reactor. Se ha optado por un equipo de la casa Kobold. El caudal calculado es de 8,92Nm<sup>3</sup>Aire/h (149NI/min) por lo que las especificaciones del equipo serán las siguientes:

Cuerpo: M

Datos de pedido: DMS-6 14 C3 F D2 3

## Sensores de presión y temperatura

Se han elegido termopares tipo k, ya que son los adecuados para soportar altas temperaturas, del fabricante Labfacility. Su rango de temperaturas es de -40°C a 1100°C y el sensor está hecho de acero inoxidable. Se adquirirán 6 para obtener datos a lo largo del reactor y otras 3 más para la obtención de datos a la salida de los gases, la entrada de aire y en el analizador.

En cuanto a los sensores de presión, se han elegido los del fabricante PCE-instruments, que son capaces de trabajar en un rango de 0 hasta 50bar.

## Válvulas de esfera

Se han elegido también dos válvulas tipo esfera que actuarán en las corrientes de gas y aire de combustión. El fabricante que las proporcionará es Salvador Escoda.

## Analizador de gases por infrarrojos

Es necesario un analizador de gases que se puede usar para el CO, el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CnHm, O<sub>2</sub> y también calcula el poder calorífico

automáticamente. Incluye los filtros y el software necesarios. Sus características son [11]:

- Repetibilidad: ±0.5% FS
- Linealidad: ±1% FS
- Cero/desviación de la calibración: ±2%FS

## La caldera

Por último, los gases de combustión se quemarán en una caldera, pudiendo en futuras investigaciones calorar el aprovechamiento de la energía generada. Se ha optado por una caldera mural de gas estándar de la casa Roca, a la que habría que modificar el quemador. Se elige una caldera modelo Novanox que trabaja con una potencia mínima de 20640kcal/h (23,97kW), por lo que se recalculan los flujos y se comprueba que siguen estando en el rango en el que trabaja el gasificador que hemos elegido Para una potencia de 25kW, los caudales obtenidos serán:

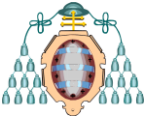
$$\dot{m}_{Biomasa} = 7,29 \cdot 10^{-5} \frac{kmol Biomasa}{s} = 6,04 \frac{kgBiomasa}{h}$$

$$\dot{V}_{Biomasa} = 2,36 \cdot 10^{-2} \frac{m^3 Biomasa}{h}$$

$$\dot{V}_{Gas} = 18,24 \frac{Nm^3 Gas}{h}$$

$$\dot{V}_{Aire} = 11,18 \frac{Nm^3 Aire}{h}$$

Se comprueba que el flujo volumétrico de gas está en el rango requerido por el gasificador seleccionado por lo que no será necesario elegir otro equipo.



### Red de tuberías

Según las características del Gasificador seleccionado, se ha optado por una red de tuberías de 40mm de diámetro del fabricante Salvador Escoda.

### Registro de variables

Para el registro de variables se ha optado por un multiplexor de 16 entradas de bucle de corriente 0-4/20mA de la casa PCE-Instruments. Así mismo, será necesario un ordenador donde registrar los datos y un software para analizarlos, en este caso se ha optado por el Labview.

### PRESUPUESTO

Según el cambio del dólar en euros el día 7 de Julio de 2015 (1dólar = 0,91Euros), el coste de la instalación sería el siguiente:

Tabla 7. Cálculo del coste de la planta experimental.

| Equipo                                   | Uds | Importe (€)     |
|--|-----|-----------------|
| Gasificador                              | 1   | 11598,86        |
| Sensor de presión                        | 6   | 1081,74         |
| Sensor de temperatura                    | 9   | 199,98          |
| Regulador de caudal (DMS-6 14 C3 F D2 3) | 1   | 895             |
| Analizador de gas por infrarrojos        | 1   | 18195,45        |
| Caldera. Modelo Platinum                 | 1   | 1593            |
| Valvulas de esfera                       | 2   | 90,4            |
| Tuberías                                 | 6   | 157,08          |
| Multiplexor                              | 1   | 147,62          |
| PC                                       | 1   | 900             |
| Software: Labview                        | 1   | 3310            |
| Mano de obra                             |     | 25600           |
| Otros (tomas de corriente, agua...)      |     | 2000            |
| Partida de contingencia                  |     | 10000           |
| <b>SUMA</b>                              |     | <b>75769,13</b> |

Por lo que por 75769,13 Euros se podría poner la planta a escala de laboratorio a funcionar.

### CONCLUSIONES

Se ha procedido al diseño de una planta experimental para obtención de energía a partir de biomasa, para realizar experimentos mediante los que evaluar la viabilidad de utilización de este sistema en zonas remotas de Colombia.

En la siguiente figura se puede ver el diseño final de la planta:

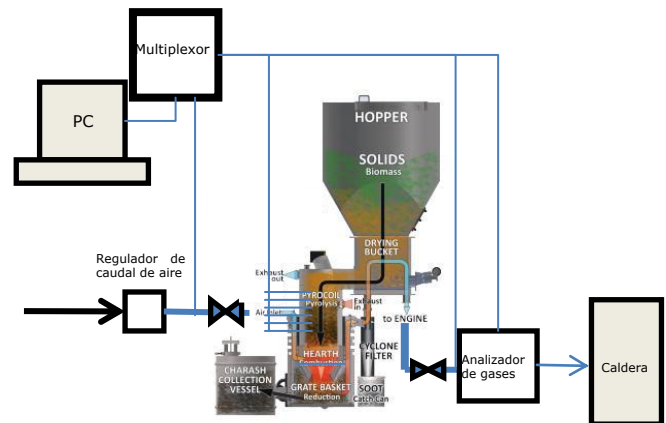
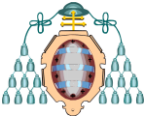


Figura 7. Diseño de una planta experimental para gasificación de materia vegetal



El equipo principal consistirá en un gasificador ya que gracias a él se obtendrá un gas que se podrá usar solo o combinado con el gas natural como combustible. Se ha optado por el tipo downdraft ya que es el que genera una menor cantidad de alquitranes que provocan fallos en los equipos y porque es el más apropiado para la escala a la que se quiere trabajar.

Se ha elegido un gasificador que trabaja a una potencia de 25kW, el flujo másico de biomasa que será necesario alimentar será de 6,04 kg biomasa/h, el flujo volumétrico de aire necesario para llevar a cabo la gasificación será de 11,17 Nm<sup>3</sup>/h y el flujo volumétrico de gases de combustión que saldrán del gasificador será de 18,24Nm<sup>3</sup>/h.

Asimismo, se han seleccionado sensores de temperatura y presión para controlar estas variables a lo largo del reactor.

Por otro lado, como la reacción es autorregulable, se utilizará un regulador de caudal de aire para controlar este parámetro, mientras que el caudal de biomasa que se debe introducir al reactor se regulará de manera manual.

También se han tenido en cuenta temas como las tuberías, valvulería, tomas de corriente y de aguas.

Se usará un analizador de gases por infrarrojos para conocer la composición de los gases a la salida del gasificador (CO, el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CnHm, O<sub>2</sub>)

Por último, se ha pensado en una caldera para quemar los gases procedentes del gasificador.

Serán necesarios también un multiplexor, un software, el Labview y un PC para el registro de los datos.

Se ha estimado un presupuesto del coste de la planta diseñada cuyo resultado final es de 75769,13 Euros.

Estas instalaciones han sido diseñadas partiendo de unas características para una biomasa típica, por lo que se deja una puerta

abierta a la realización de estudios similares para otros tipos de biomasa.

## NOMENCLATURA

H/C = Hidrógeno/Carbono

C-H-O = Carbono- Hidrógeno-Oxígeno

PCS = Poder Calorífico Superior

PCI = Poder Calorífico Inferior

$\Delta H_i^0$  = Calor de formación de i

Q = Calor necesario para llevar a cabo la gasificación

$\Delta H_{COMBUSTIÓNPRODUCTOS}^0$  = Calor de combustión de los productos

P = Potencia del gasificador

•  
 $m_{biomasa}$  = Flujo másico de biomasa que entra

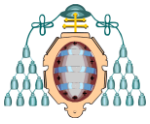
•  
 $\dot{V}_{Biomasa}$  = Flujo volumétrico de biomasa que entra

•  
 $\dot{V}_{Gas}$  = Flujo volumétrico de los gases de combustión que salen del gasificador

•  
 $\dot{V}_{Aire}$  = Flujo volumétrico del aire que se necesita introducir al equipo para llevar a cabo la gasificación

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer la ayuda prestada por el tutor de este proyecto D. Francisco Javier Fernández García y al resto de profesores del Máster en Ingeniería Energética de la Universidad de Oviedo por los conocimientos adquiridos.



## REFERENCIAS

- [1] <http://unfccc.int/>
- [2] <http://guaduarybambu.es.tl/>
- [3] A.V. Bridgwater, “*The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation*”, Fuel, 74 (5), pp.631-653, 1995
- [4] Lydia Fryda, Claudia Daza, Jan Pels, Arno Janssen, Robin Zwart, “*Lab-scale co-firing of virgin and torrefied bamboo species Guadua angustifolia Kunth as a fuel substitute in coal fired power plants*” Biomass & Bioenergy, 65, pp. 28-41, 2014
- [5] <http://www.induguadua.com/>
- [6] <http://www.plataformaarquitectura.cl/>
- [7] Prabir Basu “*Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction. Practical design and theory*” Elsevier Inc., San Diego, California, 2013
- [6] Christopher Higman, Maarten Van Der Burgt “*Gasification*” Elsevier Inc., Burlington, MA, 2008
- [7] Solar Technical Information Program, Solar energy Research Institute “*Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*” CreateSpace Independent Publishing Platform, Washington, DC, 1988
- [8] Gordon Barrow, “*Química General*”, Ed. Reverté, S.A., Barcelona, 1974
- [9] Jochen Bundschuh “*Technologies for converting biomass to useful energy combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation*” CRC Press, Boca Raton, Florida, 2013
- [10] <http://www.allpowerlabs.com/>
- [11] <https://www.pce-instruments.com/>
- [12] <http://es.farnell.com/>
- [13] <http://www.calderasroca.org/>
- [14] [www.salvadorescoda.com/](http://www.salvadorescoda.com/)
- [15] <http://www.ni.com/>