

Evaluación de Tecnologías de Quema de Biomasa en el Uruguay

Evaluation of Biomass Burner Technologies in Uruguay

*Blas Melissari*¹

Recibido: Mayo 2011

Aceptado: Setiembre 2011

Resumen.- El presente trabajo analiza las diferentes tecnologías de quema de biomasa usadas en el Uruguay desde el punto de vista del complejo e interrelacionado sistema de transferencia de flujo, masa y energía que comprenden al proceso de combustión. Se comparan y contrastan las tecnologías basadas en lecho fijo, lecho móvil y de lecho fluidizado. Se hace énfasis en la sensibilidad que tiene la calidad del combustible en los diferentes procesos. Este efecto es particularmente importante debido a la alta variación de la biomasa disponible en términos de su distribución de tamaño y composición. Los desafíos planteados por la transferencia de tecnología existente al nuevo combustible son elucidados.

Se plantea el problema a resolver para diseñar un reactor químico genérico donde se demuestra la dificultad inherente de escalar, aún teniendo una planta piloto funcionando. La complejidad del sistema hace imperioso el conocimiento profundo de los mecanismos actuantes y la influencia que tienen las variables del proceso en los mismos.

La no linealidad y grado de acoplamiento que tienen los mecanismos actuantes dificulta la solución analítica del sistema, por lo que se buscan soluciones numéricas. Se muestran resultados sobre el análisis de sensibilidad de la permeabilidad del lecho a la inestabilidad de combustión, obteniéndose así valiosas consideraciones de diseño.

Palabras claves: biomasa, combustión, modelado, lecho fluidizado

Summary-The present paper analyzes the different biomass burner technologies used in Uruguay from the combustion process standpoint, seen as a system of processes with highly non linear mechanisms of mass, momentum and energy transfer phenomena. Technologies based on fixed, moving and fluidized bed are compared and contrasted, with a special emphasis on the effect that fuel quality has on the choice of technology, given the variations found in the biomass quality, in terms of its size distribution and composition.

The problem of designing equipment for any given chemical process is stated and the inherent difficulty when scaling an existing installation is proven. The need to acquire knowledge of the processes and the relationships between them is essential for a successful scale-up. In the majority of cases, the geometry has to be altered, dramatically affecting the mechanisms within.

The highly coupled non linear system renders analytical solutions impossible, so approximate numerical solutions are sought. Numerical results of a study of the sensitivity of bed permeability on combustion stability are shown.

Keywords: biomass, burner, combustion, modelling, fluidized bed

¹ Dr. Ing. Facultad de Ingeniería - Universidad de Montevideo. **b3**consultores bmelissari@um.edu.uy

1. **Introducción.-** La importancia de la biomasa vista como fuente de energía continúa aumentando, especialmente por su capacidad de renovarse y por su nulo aporte neto de anhídrido carbónico. Los procesos en calderas, quemadores y gasificadores involucran una variedad de procesos físico-químicos sumamente interrelacionados, incluyendo transferencia de calor, masa y flujo, cinética de reacciones, coexistencia de estados y grandes variaciones de velocidad, temperatura y composición. Desde el punto de vista de inversión, el atractivo radica principalmente en que se puede cultivar el combustible cerca de la planta, no al revés como tan frecuentemente sucede. A veces el mismo combustible es producido como subproducto de la propia industria. La quema de este residuo soluciona además el problema de la disposición del mismo.

Por todas estas razones, el número de profesionales y estudiantes de postgrado abocados a este tema está aumentando en todo el mundo. Para comenzar a comprender el sistema es necesario conocer las propiedades físicas y químicas de nuestro combustible. Luego se diferencian y se identifican los procesos fundamentales de transformación, comenzando por el secado, siguiendo con la pirólisis, devolatilización, gasificación y culminando con una definición de combustión.

Dada la complejidad del sistema, nos planteamos el problema a resolver para diseñar un reactor químico genérico donde se demuestra la dificultad inherente de escalar, aún teniendo una planta piloto funcionando. La complejidad del sistema hace imperioso el conocimiento profundo de los mecanismos actuantes y la influencia que tiene la temperatura en ellos. La gran mayoría de las veces, una similitud geométrica no es posible, afectando todas las hipótesis de similitud tomadas en los mecanismos actuantes. La necesidad de tener un modelo del sistema es imperiosa, de manera de poder estudiar cómo afectan unas variables entre sí, qué condiciones mejoran el rendimiento, cuál será la cantidad y composición de los gases generados, etc. De esta manera se establece un modelo que describe el proceso y las interacciones entre sus mecanismos.

El modelo matemático debe poder predecir el comportamiento de un sistema real. Para asegurarnos de esto, se toman medidas experimentales en los equipos funcionando y se comparan con las predicciones del modelo, en un proceso llamado validación.

Los cambios en la forma, tamaño y composición del nuevo combustible fuerzan cambios tecnológicos y al desplazamiento desde un tipo de tecnología a otro, por la fuerte influencia que tienen esos cambios en la combustión. Describiremos las diferentes tecnologías enfocados en los mecanismos actuantes en las mismas, y las compararemos en función de su aplicabilidad con el nuevo combustible: la biomasa.

2. **Los combustibles.-** Los combustibles sólidos más relevantes son el carbón y la biomasa en general. Todos están compuestos por cadenas complejas de polímeros orgánicos, principalmente compuestos aromáticos combinados con hidrocarburos y otros átomos como Oxígeno, Nitrógeno, Azufre, Potasio y Sodio. La biomasa está compuesta por materia vegetal o animal, desde rolos de leña, aserrín de madera hasta residuos industriales. El carbón es básicamente el resultado del deterioro lento de la biomasa. El grado de este deterioro determina el grado o calidad del carbón, desde Lignito para el menor deterioro hasta Antracita para el mayor.

2.1 **Propiedades Físicas.-** Las características físicas más importantes en los combustibles sólidos son el tamaño de sus partículas (y su distribución), su forma y su porosidad. Cualquiera de estas características tiene un efecto dramático en los procesos de combustión.

Además del tamaño de las partículas, su forma afecta varios de los fenómenos ocurrentes durante la combustión, como las reacciones gas/sólido que dependen del área de contacto. Las partículas con menor área serían las esféricas, aunque la porosidad de las mismas puede aumentar el área de intercambio complicando bastante la caracterización de los combustibles sólidos. La forma también afecta fuertemente la dinámica de combustión cuando se trata de lecho fluidizado o transporte neumático. El parámetro más usado para caracterizar la forma de una partícula es su esfericidad, definida como el cociente entre el área expuesta de la partícula y el área que tendría

una esfera de igual volumen que la partícula. El chip de madera tiene una esfericidad aproximada de 0.2, aunque puede ser medida fácilmente en el laboratorio para cada caso particular.

Los combustibles sólidos son altamente porosos, conteniendo en general un 50% de su interior con túneles capaces de transportar gases, muchos de los cuales tienen un diámetro microscópico. Esto conlleva a encontrar combustibles con una alta área expuesta, con valores que pueden llegar a los 500 m²/g. Por supuesto, no toda el área es accesible para las reacciones o está expuesta de la misma manera, así que existen otros parámetros adicionales como la **tortuosidad**, que tienen en cuenta este hecho. Un análisis de la influencia de la porosidad en las reacciones heterogéneas intervinientes en la combustión puede encontrarse en [1].

2.2 Propiedades Químicas.- La composición y estructura molecular de la biomasa es muy compleja, incluyendo una variedad de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, en su mayoría cadenas de hidrocarburos (C, H, O y N) con átomos adicionales como S, Fe, Ca, Al, Si, Zn, Na, K, Mg, Cl, metales pesados, etc.

El producto de la descomposición de la biomasa son gases y líquidos enriquecidos en Hidrógeno, por lo que se encuentra una gran diferencia en la relación Carbono a Hidrógeno (C/H) de los diferentes combustibles. La biomasa en general tiene un C/H de 10 mientras la antracita puede llegar a un valor de 30.

Para hallar la cantidad de los diferentes componentes presentes en el combustible se pueden realizar varios análisis, el más simple es el análisis próximo, del cual se obtienen los siguientes resultados:

- Humedad: obteniéndose al mantener la muestra en una atmósfera inerte a 105°C hasta que no se observa cambio de peso.
- Volátiles: manteniendo la muestra seca en una atmósfera inerte a unos 1000°C hasta que no se observa cambio de peso.
- Carbono fijo: haciendo reaccionar la muestra devolatilizada con Oxígeno hasta que no se observa cambio de peso.
- Cenizas: determinada por la masa remanente luego de todas las reacciones anteriores.

La Tabla I muestra una comparación entre los resultados típicos del análisis próximo de madera y cáscara de arroz, en base seca.

Componente	Madera	Cáscara de arroz
Volátiles	80%	65%
Carbono fijo	18%	15%
Ceniza	2%	20%

Tabla I.- Análisis próximo de madera y cáscara de arroz, en base seca.

La humedad del combustible es una de las características esenciales para tener en cuenta al diseñar los equipos, ya que tiene un efecto importante en la estabilidad del proceso, en la dinámica de reacciones y en el balance de energía. La gran mayoría de los equipos no están diseñados para humedades en el combustible que superen los 30 a 40%, por lo que en general se buscan soluciones de secado previo al ingreso del combustible.

Para determinar las fracciones de masa de los diferentes elementos en el combustible se puede realizar un análisis último, donde se obtiene el Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre. [2-5]

3. Procesos durante la combustión.- Como hemos visto en la descripción del análisis próximo del combustible, una serie de procesos tienen lugar cuando aumenta la temperatura. La secuencia

y características de los procesos dependen de las propiedades físicas y químicas del combustible y de las condiciones que rodean a las partículas, como temperatura, presión y composición. Además, el ritmo de calentamiento del combustible juega un papel importante en la dinámica de las reacciones que se llevan a cabo. Las diferentes transformaciones que se dan pueden agruparse sintéticamente de la siguiente manera:

Secado: proceso mediante el cual el agua líquida abandona la partícula de combustible en forma de vapor.

A pesar de su aparente simpleza, el secado de una partícula es un proceso complejo donde el agua se presenta en la fase líquida y gaseosa fluyendo en un medio poroso. La velocidad de transferencia de masa depende principalmente de la temperatura de la partícula (en particular de la interface gas/líquido), de la permeabilidad del sólido y de la concentración de vapor alrededor de la partícula.

Pirólisis o devolatilización: mediante la cual gases y líquidos son generados y expulsados de la partícula como resultado de su aumento de temperatura. Una serie de importantes transformaciones y reacciones (principalmente endotérmicas) ocurren dentro de la misma, produciendo tres fracciones:

- gases livianos como H_2 , CH_4 , CO , CO_2 y H_2O ;
- alquitrán, compuesto por moléculas orgánicas e inorgánicas que escapan del combustible como gases y/o líquidos en forma de niebla;
- sólido carbonizado remanente.

Las características, composición y cantidades de especies químicas que son producidas dependen de un gran número de variables, siendo las más relevantes la composición y estructura del combustible, la temperatura, presión y composición de la atmósfera circundante, y la temperatura y rapidez de calentamiento de la partícula.

Gasificación: donde la partícula sólida reacciona con los gases a su alrededor. Las reacciones de gasificación más relevantes son:

- Carbono sólido y agua: $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
- Carbono sólido y dióxido de carbono: $C + CO_2 \rightarrow 2CO$
- Carbono sólido e hidrógeno: $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$

Si el Oxígeno se encuentra presente en los gases de reacción, al proceso de gasificación se le denomina combustión que en mayor medida es la oxidación del carbono transformándose en una combinación de óxidos, de manera exotérmica.

Estas transformaciones no se dan de manera secuencial, sino que se dan de manera simultánea formando un sistema altamente acoplado, donde cada proceso afecta los demás. Los métodos para determinar la dinámica de la pirólisis y las reacciones sólido/gas reinantes en estos procesos pueden profundizarse en las referencias [6-13]

4. Diseño de equipos industriales.- Los procesos complejos y fuertemente interrelacionados durante la combustión no obedecen dependencias lineales con parámetros geométricos de los equipos donde ocurren. En muchos casos, un equipo que funciona de determinada manera en la planta piloto no funciona igual en planta. El siguiente ejemplo ilustra este punto.

Supongamos que queremos estudiar un simple reactor químico como el esquematizado en la Figura I. Los reactivos A y B son inyectados continuamente en el reactor, siendo su reacción exotérmica. El producto C también sale del reactor de manera continua. Para recuperar energía de la reacción se utiliza agua, de manera que el sistema trabaja de manera permanente. Se encuentran en el experimento unas condiciones en las cuales el proceso genera una máxima cantidad de energía (temperatura, presión, composición, tiempo de residencia, etc.). Se quiere ahora diseñar un sistema a escala industrial, que entregue 10 veces la potencia del piloto,

$$Q = 10.Q_0.$$

Suponiendo que la planta será similar al piloto, se estima que para generar 10 veces más potencia son necesarios 10 veces más reactivos. Para mantener el tiempo de residencia óptimo hallado en el piloto, se requiere entonces tener 10 veces más volumen, $V = 10 \cdot V_0$.

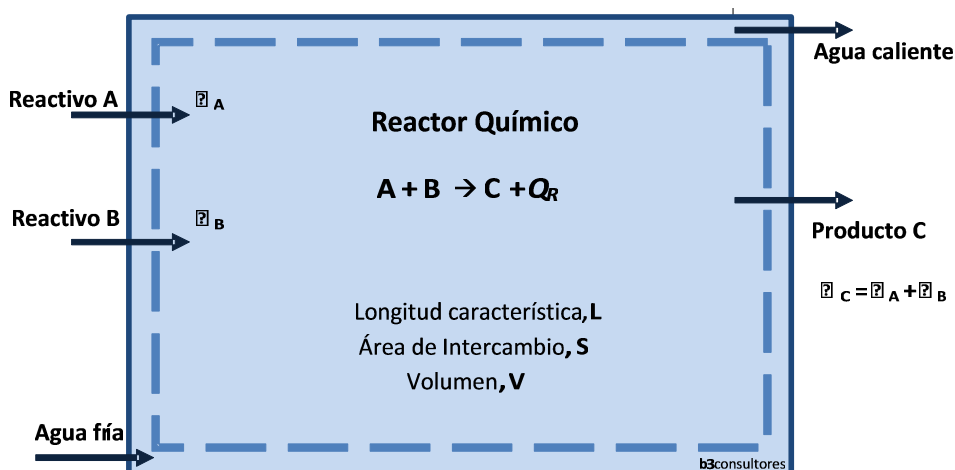


Figura I.- Esquema de reactor químico

La geometría es otra variable a mantener, ya que la dinámica del proceso es fuertemente dependiente de la forma del equipo donde ocurre la reacción.

Para aumentar el volumen 10 veces ($V=S \times L$), la longitud característica debe aumentarse unas 2 veces ($10^{1/3}$) mientras que el área queda aumentada en casi 5 veces ($10^{2/3}$). El área de intercambio es la mitad de lo que sería la planta piloto, lo que afectaría dramáticamente la capacidad de intercambio, además de afectar las condiciones del proceso, especialmente la temperatura.

Si quisiéramos aumentar el área 10 veces, quedaría el volumen aumentado en más de 30 veces ($10^{3/2}$) lo cual triplicaría el tiempo de residencia en relación al óptimo encontrado en la planta piloto.

La única manera de lograr 10 veces más volumen a la vez que obtener 10 veces más área es cambiar la geometría del reactor. Al cambiar la geometría cambia radicalmente el sistema, al ser la distribución de temperaturas, composiciones y velocidades totalmente diferentes a la planta piloto.

El conocimiento de los mecanismos actuantes en las reacciones químicas, implementadas en un modelo que pueda simular el comportamiento físico-químico prevaeciente, y que sea validado con resultados experimentales, es clave para encontrar la configuración geométrica y punto de funcionamiento óptimo de un equipo industrial con la complejidad que posee un quemador de biomasa.

Para estudiar la estabilidad del proceso de combustión en un lecho de combustible sólido permeable, se implementó un modelo, donde se puede variar la permeabilidad total del lecho y estudiar la propensión a formar canales preferenciales de flujo. Estos canales pueden explicar algunos de los problemas de los gasógenos verticales funcionando con combustible fino como chips de madera. La Figura II muestra cuatro casos en los que se evidencia la tendencia a formar canales de flujo al bajar la permeabilidad del lecho (la caída de presión total, o $\Delta p/\Delta z$)

Para poder interpretar estos resultados, utilicemos los resultados de pérdida de carga en un medio permeable obtenida por Ergun [14]. Asumamos un flujo en medio permeable sometido a un Δp , donde el gradiente de presiones es evaluado por la ecuación empírica:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = C_1 \left(\frac{\mu}{\varepsilon \cdot \delta^2} \right) U + C_2 \left(\frac{\rho}{\varepsilon^2 \delta} \right) U^2$$

Donde,

C_1 y C_2 son constantes de ajuste a los experimentos

ρ es la densidad del gas

μ es la viscosidad del gas

ε es la porosidad

δ es el tamaño característico promedio del combustible

U es la velocidad media

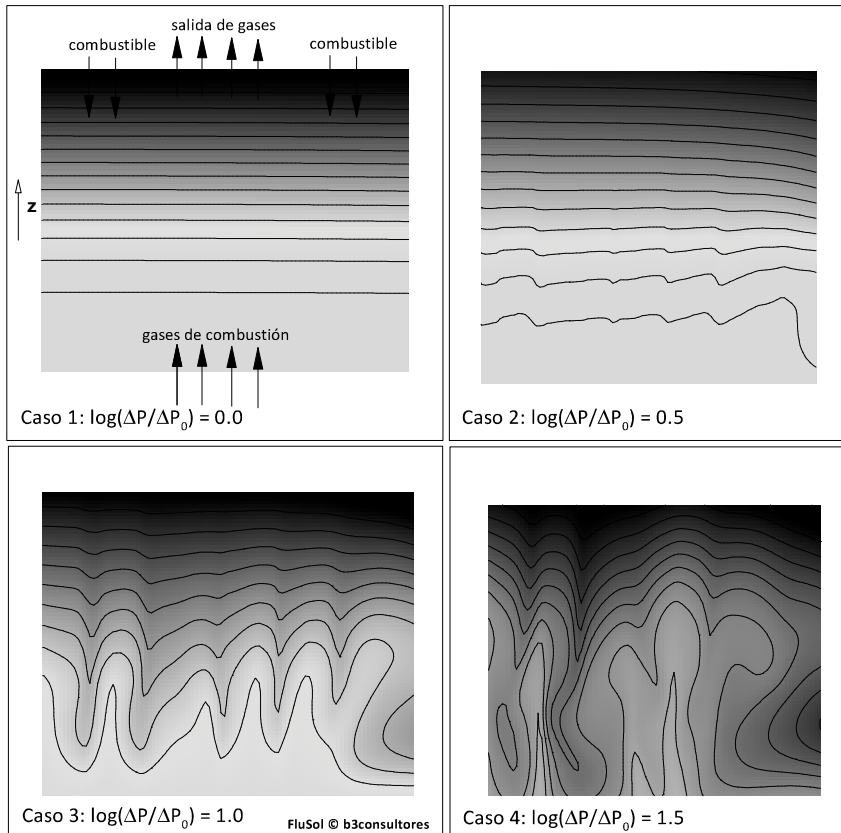


Figura II.- Estabilidad de flujo en función de la permeabilidad del lecho

Caso 1: Alta permeabilidad del lecho (madera en rolos) → flujo uniforme: $T=T(z)$, $u=u(z)$

Caso 2: Típica permeabilidad del lecho con chip de longitud 10mm a 20mm. A medida que la permeabilidad del lecho disminuye, se presentan canales preferenciales de pasaje. Este fenómeno es inestable, ya que al avanzar el frente caliente, la transformación en cenizas disminuye localmente la permeabilidad y favorece aún más el pasaje de gases calientes. Si la permeabilidad es suficientemente baja, los canales avanzan en el sentido perpendicular y el fenómeno se auto controla formando canales que se unen, restableciendo la uniformidad.

Caso 3 y 4: Permeabilidad 10 veces menor a la calculada para un lecho "perfecto" de chips de 10mm a 20mm. Esto se explica por fenómenos de atrición, compactación y segregación de partes finas en la parte inferior del lecho (menor porosidad y tamaño, que en conjunto tienen una

incidencia cúbica en la permeabilidad) [14]. La mitad de tamaño implica 8 veces menos permeabilidad.

Los canales de pasaje son evidentes, las temperaturas localizadas aumentan drásticamente, causando inestabilidades en la producción de gases y ablandamiento/fusión localizada de cenizas.

5. Equipos.- Existe una gran diversidad de maneras de diseñar los equipamientos donde van a interactuar los elementos sólidos con los gases. Por ejemplo, las partículas sólidas pueden ser inyectadas en la cámara donde están los gases y las condiciones presentes para las reacciones. Si estas partículas tienen baja densidad y/o tamaño, pueden quedar suspendidas en los gases. Otra manera de facilitar la reacción sería haciendo pasar gases a través de un lecho de partículas de combustible. Si estas partículas permanecen en su lugar durante las reacciones, el equipo se denomina de lecho fijo. Si las partículas se mueven pero no hay movimiento relativo entre ellas, el equipo se denomina de lecho móvil. Si las partículas tienen movimiento relativo entre si se denomina lecho fluidizado.

Supongamos que tenemos un lecho de partículas sobre una grilla y se hacen circular gases inyectados desde abajo del lecho, a una velocidad U . Esta no es la velocidad localizada entre las partículas, sino la calculada sobre toda el área del lecho, como si no hubiera partículas presentes.

Cuando la velocidad U es baja, el gas se filtra en el lecho, aumenta la velocidad localizada entre partículas pero la transferencia de cantidad de movimiento entre las fases no alcanza para ocasionar movimientos en el lecho. En este régimen trabajan los equipos de lecho fijo y móvil.

Si la velocidad U aumenta lo suficiente, el lecho comienza a expandirse, se nota movimiento entre las partículas y éstas comienzan a separarse unas de otras. Ésta se denomina *velocidad mínima de fluidización*, U_{mf} . Localmente, la velocidad alcanza valores que superan la levitación de las partículas en algunas zonas del lecho.

Si la velocidad es lo suficientemente alta como para causar levitación de todas las partículas presentes en el lecho entonces habrá un movimiento absoluto de partículas del lecho. Este régimen se denomina transporte neumático, y es utilizado en sistemas donde las partículas son arrastradas por los gases como en cámaras torsionales de combustión.

5.1 Equipos de Lecho Fijo.- La Figura III esquematiza una posible configuración de un sistema de lecho fijo, denominado: gasificador vertical en contracorriente. Este tipo de sistema ha sido utilizado por varios siglos, principalmente usando leña. El combustible es inyectado por la parte superior y va fluyendo hacia la parte inferior donde el residuo es extraído. Los agentes de gasificación y combustión (normalmente aire y vapor de agua) son inyectados a través de un distribuidor por la parte inferior.

En su recorrido, las partículas sufren las transformaciones anteriormente mencionadas de secado, devolatilización, gasificación y/o combustión, que de ninguna manera son secuenciales, sino que se combinan de manera muy compleja. Por ejemplo, una partícula puede estar sufriendo una devolatilización en sus capas externas y secado en su interior, siendo ambos procesos fuertemente acoplados. Una revisión de esta tecnología y una descripción detallada de las reacciones químicas y transformaciones físicas que ocurren en el proceso pueden encontrarse en las referencias [15-16].

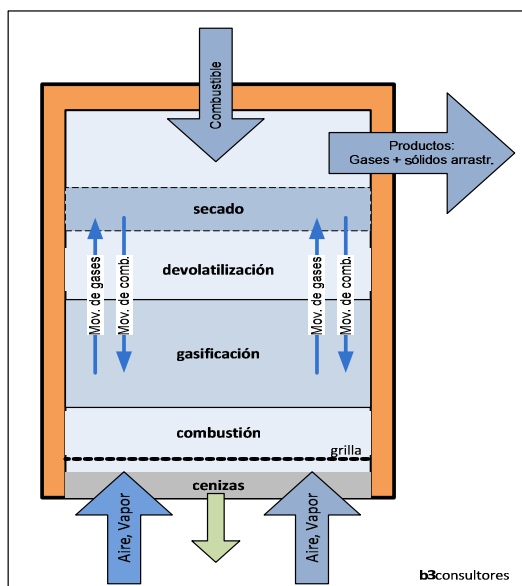


Figura III.- Vista esquemática de un gasógeno vertical en contracorriente.

En la zona de combustión la reacción consume el oxígeno del aire inyectado generando calor que sube con los gases y calienta la masa de combustible entrante. En la zona de gasificación, el H_2O y CO_2 reaccionan con el carbono formando CO y H_2 . En la zona de devolatilización ocurre una serie de reacciones entre los gases y el combustible entrante, produciendo más gases combustibles, CO_2 y alquitrán (transformación de la resina existente en el combustible).

El gas frío entra y se encuentra con el combustible caliente debido a la zona de combustión y aumenta su temperatura rápidamente. Cuando el oxígeno es consumido, la reacción no aporta energía y los gases comienzan a enfriarse, por encontrarse con combustible más frío y por tratarse de reacciones endotérmicas en la zona de gasificación.

Los gases continúan su ascenso y finalmente reaccionan con el combustible entrante y vapor de agua del secado, produciendo una significativa cantidad de alquitrán. Este alquitrán no se consume y condensa contra las paredes del equipo ocasionando una serie de problemas de estabilidad y seguridad.

La composición típica de salida de gases de estos equipos es 20% de CO , 10% de CO_2 , 15% de H_2 y 2% de CH_4 (en mol%), con una entalpía de 5MJ/kg, lo que limita el proceso a aplicaciones donde no se requiera una alta temperatura de llama. Con una correcta mezcla de oxígeno puro y vapor de agua como agentes de gasificación se pueden obtener productos con una mayor entalpía.

5.2 Equipos de Lecho Móvil.- Además de los sistemas verticales que se describieron, existe una variedad de sistemas, denominados de lecho móvil, donde se puede realizar la combustión de biomasa. Cada sistema está diseñado específicamente para el tipo de combustible, siendo algunos diseños más adaptables que otros, en cuanto al tipo, tamaño y humedad del combustible a utilizar, como analizaremos posteriormente.

Algunos de estos diseños se pueden ver esquematizados en la Figura IV. El combustible es inyectado continuamente por la parte superior y el aire es inyectado a través de la parrilla en la parte inferior. La parrilla vibra o se mueve de manera de empujar el combustible a tal velocidad que asegure la mayor conversión a ceniza, la cual es extraída por la parte inferior. En otras palabras, se diseña con suficiente tiempo de residencia como para que el combustible libere su mayor cantidad de energía. Se puede profundizar este tema en las referencias [15-18].

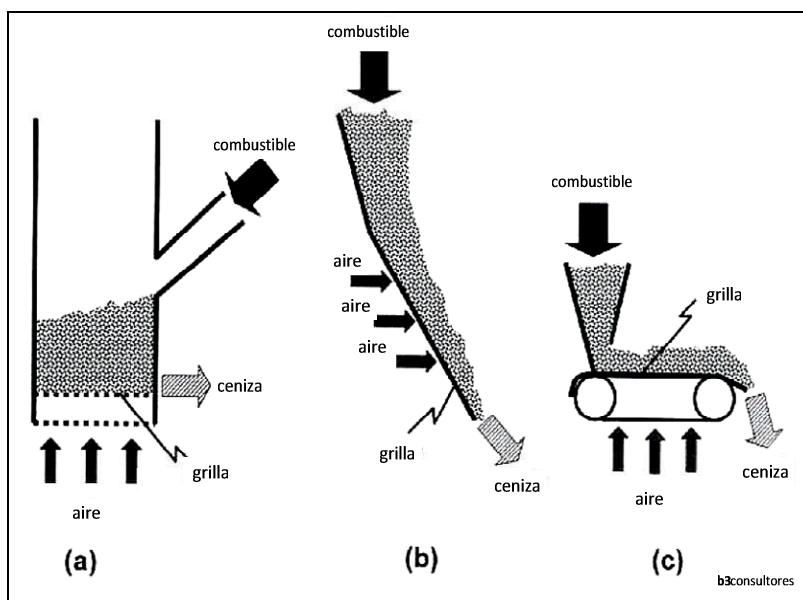


Figura IV.- Sistemas de lecho móvil (a) barras vibratorias (b) parrilla móvil escalonada (c) transporte continuo

5.3 Equipos de Lecho Fluidizado.- Una de las posibles configuraciones de lecho fluidizado se ve esquematizada en la Figura V. El combustible ingresa por un costado y el aire por debajo. El mecanismo de segregación es autoregulante, ya que las partículas quemadas salen mientras los trozos grandes caen hasta ser consumidos. El tiempo de residencia es, no es impuesto por diseño basado en un tamaño promedio.

El distribuidor de aire varía desde una simple placa perforada hasta sistemas mecanizados de remoción de cenizas, pero el requerimiento básico es que proporcione suficiente energía cinética para levantar las partículas de combustible.

Sobre este distribuidor se encuentra el lecho de combustible, que forma una suspensión con el aire entrante. La mayor parte de las reacciones se llevan a cabo en esta suspensión. El movimiento e interacción entre las fases garantiza un alto grado de homogeneización de las temperaturas y composiciones a lo largo del lecho. La alta transferencia de masa y calor debido al movimiento tienden a uniformizar las temperaturas en el equipo.

Sobre la parte superior del lecho se encuentra una zona diseñada de tal manera de permitir la separación de partículas pesadas del resto, obligándolas a descender donde continúa la reacción. Esta segregación es una de las claves fundamentales de esta tecnología, y es el hecho que el tiempo de residencia no está impuesto por el diseño sino que cada partícula permanece el tiempo necesario. Hasta que no reacciona no es lo suficientemente liviana como para escapar por la chimenea.

Algunos equipos están diseñados con un ciclón para recuperar los sólidos que aún no terminaron su reacción, como se ve esquematizado en la Figura V.

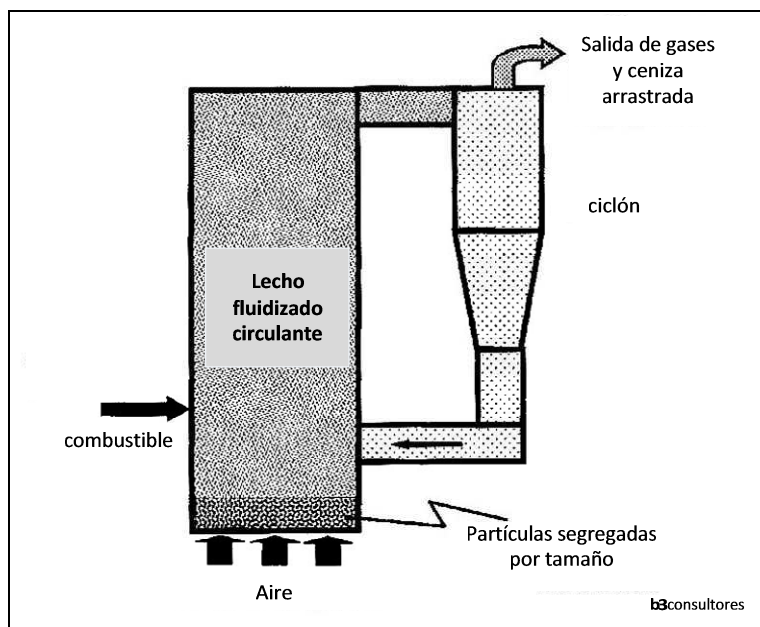
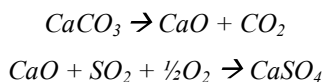


Figura V.- Esquema de quemador de lecho fluidizado

La tecnología de lecho fluidizado puede aplicarse en una variedad de equipos industriales, entre los que se encuentran calderas y sistemas de gasificación, que son el foco principal de este trabajo. Más información sobre las aplicaciones de esta tecnología puede encontrarse en las referencias [19-22].

La temperatura tiene un fuerte efecto en las emisiones tóxicas producto de la combustión, particularmente los NO_x . Los equipos de lecho fluidizado, al tener la temperatura más uniforme, producen mucho menos emisiones tóxicas. El agregado de piedra Caliza neutraliza las emisiones de Azufre, como se ejemplifica en las siguientes reacciones:



La Tabla II resume y compara las características de las tecnologías de quema de biomasa.

Característica	Gasógenos	Lecho móvil	Lecho fluidizado
Temperaturas en equipo	Varían significativamente de un punto a otro pasando por picos extremos.	Temperaturas más uniformes, variando en el sentido del movimiento de combustible.	Mayor homogeneidad y mezcla resultantes en una menor temperatura promedio sin picos altos.
Concentración de alquitrán	Alta debido a condiciones de volatilización a la salida de gases. Precipitación.	Baja debido a que su formación ocurre dentro del lecho, garantizando su transformación.	Baja debido a que su formación ocurre dentro del lecho, garantizando su transformación por cracking.
Sensibilidad a la calidad del combustible	Alta, por necesitar un mínimo de concentración de carbono, permeabilidad, etc. Muy sensible a la humedad.	Baja. El lecho trabaja a menores temperaturas permitiendo la quema de combustibles de menor calidad	Baja. El lecho trabaja a menores temperaturas permitiendo la quema de combustibles de menor calidad

Flexibilidad cantidad combustible	Moderada. Equipo capaz de trabajar en un rango entre 75% y 150% de su capacidad nominal.	Alta. Equipo capaz de trabajar en un rango entre 50% y 200% sin pérdida de eficiencia.	Alta. Equipo capaz de trabajar en un rango entre 50% y 200% sin pérdida de eficiencia.
Controlabilidad (respuesta a cambios operacionales)	Baja. Tiempo de respuesta de 1hr en planta piloto y de 8hr en equipo industrial.	Moderada/Alta. Tiempo de respuesta menor a 1hr debido al menor tiempo del ciclo.	Alta. Tiempo de respuesta menor debido a la mayor mezcla en equipo.
Riesgos operacionales	Altos, debidos a inestabilidades en formación de gases, vitrificación de cenizas y formación de alquitrán en salida.	Bajos, debido a mayor estabilidad de proceso, menores picos de temperatura y eliminación de alquitrán.	Bajos, debido a mayor estabilidad de proceso, menores picos de temperatura y eliminación de alquitrán.
Nivel de emisiones	Alto y difícil de controlar y evitar.	Moderado, por menor temperatura promedio. Posibilidades de controlar	Bajo, por menores temperaturas. Mayor posibilidad de control agregando Caliza.
Eficiencia	70% a 80%	60% a 70%	60% a 70%, 85% para equipos presurizados.
Costo de Capital	Moderado, mayor volumen y mayor temperatura promedio.	Moderado, menor volumen y menor temperatura promedio.	Bajo, menor volumen y menor temperatura, sin partes móviles.
Costo Operativo / Mantenimiento	Moderado. Afectado por interrupciones debido a solidificación de cenizas o precipitación de alquitrán.	Moderado. Partes móviles de acero inoxidable con costo de mantenimiento.	Bajo, equipo con menor temperatura sin partes móviles.

Tabla II.- Comparación entre tecnologías de quema de biomasa.

6. Conclusiones.- Se realizó una evaluación de las tres tecnologías usadas para quemar biomasa en el Uruguay, desde el punto de vista del proceso físico-químico, haciendo énfasis en la sensibilidad de cada una a los cambios recientes en el combustible disponible (más fino y con mayor variabilidad en cuanto a calidad y composición)

Los gasificadores verticales tienen una excesiva pérdida de carga para combustibles finos, lo cual ocasiona inestabilidades en el proceso, formación de chimeneas, fusión de cenizas, etc. Para poder quemar combustible fino y/o húmedo, los sistemas incluyen generalmente detalles de diseño que están patentadas porque son el resultado de investigación y desarrollo de los mismos fabricantes. Estos pueden ser condiciones de presión y temperatura controladas, inyecciones estratégicas de oxígeno y vapor de agua e incluso la presencia de antorchas de plasma en el interior del gasógeno.

Como muestran los resultados numéricos y se ha evidenciado en equipamientos reales, para mantener una pérdida de carga al disminuir el tamaño de la partícula, la tendencia es a disminuir la profundidad del lecho en la dirección del pasaje de gases.

Los equipos con lecho bajo pueden ser aplicados en una variedad de situaciones en cuanto a la calidad y cantidad de combustible. Tienen menor tiempo de respuesta, menores emisiones, menores puntos calientes y mayor seguridad. Los equipos que han sido implementados satisfactoriamente utilizando combustible fino y diverso son los de quema directa con parrilla móvil.

Por otra parte, los equipos de lecho fluidizado tienen algunas de estas ventajas potenciadas, ya que la mayor mezcla resulta en una mayor homogeneidad sin puntos calientes ni fusión de

cenizas, el equipo es de menor porte y si incluye un sistema sin partes móviles entonces tanto el costo de inversión inicial como el costo operativo se verán substancialmente reducidos.

7. Referencias

- [1] Gadiou, R., Bouzidi, Y., Prado, G. The devolatilization of milimetre sized coal particles at high heating rate: the influence of pressure on the structure and reactivity of the char. *Fuel* 2002. 81:2121–2130.
- [2] Smith, K.L., Smoot, L.D., Fletcher, T.H., Pugmire, R.J. *The Structure and Reaction Processes of Coal*. 1994 New York: Plenum Press.
- [3] Smith, K.L., Smoot, L.D. Characteristics of commonly-used U.S. coals—towards a set of standard research coals. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1990. 16:1–53.
- [4] Miles, T.R., Miles, T.R., Baxter, L.L., Bryers, R.W., Jenkins, B.M., Oden, L.L.. *Alkali Depositions Found in Biomass Power Plants: A Preliminary Investigation of their Extend and Nature*. 1995 National Renewable Energy Laboratory.
- [5] Jenkins, B.M., Bakker, R.R., Wei, J.B. On the properties of washed straw. *Biomass and Bioenergy*. 1996. 10(4):177–200.
- [6] Carrasco, F. The evaluation of kinetic parameters from thermogravimetric data: comparison between established methods and the general analytical equation. *Thermochimica Acta*. 1993. 213:115–134.
- [7] Anthony, D.B., Howard, J.B. Coal devolatilization and hydrogasification. *AIChE J.* 1976 22(4):625–656.
- [8] Stone, H.N., Batchelor, J.D., Johnstone, H.F. Low temperature carbonisation rates in a fluidised-bed. *Ind. Eng. Chem.* 1954. 46:274.
- [9] Zielke, C.W., Gorin, E. Kinetics of carbon gasification. *Ind. Eng. Chem* 1955. 47:820.
- [10] Peters, W., Bertling, H. Kinetics of the rapid degasification of coals. *Fuel*. 1965. 44:317.
- [11] Jones, W.I. The thermal decomposition of coals. *J. Inst. Fuel*. 1964. 37:3.
- [12] Tsuge, S. Analytical pyrolysis—past, present and future. *J. Analytical and Applied Pyrolysis*. 1995, 32:1–6.
- [13] Bridgwater, A.V., Peacocke, G.V.C. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2000, 4:1–73.
- [14] Ergun, S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress* 1952, 48:91–94.
- [15] Hobbs, M.L., Radulovic, P.T., Smoot, L.D. Combustion and gasification of coals in fixed-beds. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1993, 19:505–556.
- [16] Salo, K., Jartunen, M., Asplund, D. *Production of Fuel with Gasification of Peat in Fixed Bed. Peat as an Energy Alternative* Arlington, Virginia. 1980.
- [17] Wen, C.Y., Lee, E.S. *Coal Conversion Technology*. Reading, Massachusetts. 1979. Addison-Wesley.
- [18] Perry, J.H., Green, D.W., Maloney, J.O. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 7th Ed. 1997 New York: McGraw-Hill.
- [19] Kunii, D., Levenspiel, O. *Fluidization Engineering*. 2nd Ed. 1991 New York: John Wiley.
- [20] Geldart, D. *Gas Fluidization Technology*. 1986 Chichester, U.K.: John Wiley.
- [21] Davidson, J.F., Harrison, D. *Fluidized Particles*. 1963 Cambridge: University Press.
- [22] Yang, W.C. *Fluidization Solids Handling and Processing*. 1999 Westwood, NJ: Noyes.