

# CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA EN LECHO FIJO: ANÁLISIS DE LA FASE LIMITADA POR OXÍGENO

PATÍÑO VILAS, David<sup>(1)</sup>; MORÁN GONZÁLEZ Jorge<sup>(1)</sup>; PORTEIRO FRESCO, Jacobo<sup>(1)</sup>

REGUEIRO PEREIRA, Araceli<sup>(1)</sup>; MÍGUEZ TABARÉS, Jose Luis<sup>(1)</sup>;

[patinho@uvigo.es](mailto:patinho@uvigo.es)

<sup>(1)</sup>Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial

## RESUMEN

Diversos trabajos se llevan a cabo en la actualidad en quemadores experimentales de biomasa de lecho fijo. Su geometría simplificada, la obtención precisa de datos intra-lecho y su elevada operatividad han contribuido al desarrollo de estos sistemas [1-3]. A pesar de la gran cantidad de estudios desarrollados, todavía existe cierta discrepancia o falta de información acerca de la estructura interna del lecho.

Con esto en mente, el presente trabajo pretende establecer algunas ideas generales a cerca del proceso de combustión en el lecho o zona de entrada de aire primario (gasificación), enfocada en la fase de combustión heterogénea de char bajo condiciones limitadas por la ausencia de oxígeno.

Para ello, se analizan datos experimentales de un quemador de alimentación inferior con aire zonificado en términos de régimen de combustión y relación estequiométrica. Los resultados muestran una clara relación entre la tasa de combustión y el reparto de aire  $1^{\circ}/2^{\circ}$ . Además, cuanto mayor es el suministro de aire, mayor es el consumo de combustible. En esencia, el incremento de material gasificado (volatilizado) en la zona de combustión primaria reacciona adecuadamente con el aire secundario, liberando mayor calor y evitando que se alcance la situación de enfriamiento por convección. Como consecuencia, el rango de aire de trabajo útil obtenido es muy amplio, pero el exceso con el que se produce ( $\lambda$ ) se mantienen aproximadamente constante. Dicho de otro modo, existe un incremento proporcional entre el caudal de aire suministrado y el combustible quemado.

Profundizando en el análisis de la fase de combustión heterogénea, se encontró que la tasa de consumo es proporcional al suministro de aire primario, independientemente del reparto aplicado. Esto indica que la tasa de reacción depende exclusivamente de la tasa de suministro de oxígeno al lecho o frente de reacción. De hecho, el exceso de aire referido a la combustión completa de char para obtener  $\text{CO}_2$  ( $\lambda_C$ ) se mantiene constante y cercano al estequiométrico.

Los resultados mencionados parecen respaldar la idea de que la tasa de reacción de char (oxidación y reducción) en un quemador de alimentación inferior y con reparto de aire está limitada por la presencia de oxígeno en un amplio rango de trabajo. En estas condiciones, la tasa de reacción viene determinada totalmente por el suministro de aire primario, de manera casi independiente a otras variables operativas.

**Palabras clave:** Combustión biomasa, reacción limitada, estequiometría, oxígeno, lecho fijo

## 1. Antecedentes

### 1.1. Combustión de carbón

Cualquier trabajo sobre la combustión de biomasa en lecho fijo parte de una herencia directa de los trabajos de lecho fijo en carbón. Dado el mayor nivel de desarrollo de esa investigación en el pasado y su cercanía en cuanto a composición y comportamiento, las primeras referencias a consultar pueden obtenerse de dicho campo.

De los diversos modos de combustión directa del carbón uno de los más recurridos por su sencillez constructiva y economía es la combustión en lecho fijo con alimentación superior (overfeed bed). En este caso el combustible es alimentado por gravedad a una parrilla dónde se quema gracias a la aportación de una corriente de aire primario introducido inferiormente. Habitualmente existirán otras entradas de aire superiores (secundario y terciario) que contribuirán al aporte de oxígeno a la combustión homogénea con las proporciones necesarias. Cuanto mayor contenido de volátiles presente el carbón, más necesaria será la zonificación de aire.

Simplificando al máximo el análisis, podemos suponer que el carbón empleado no tiene volátiles, por lo que las reacciones homogéneas y aporte de calor de la llama en la zona superior de lecho será muy pequeño. El principal aporte de calor provendrá de la zona heterogénea de reacción de char. Las partículas nuevas se añaden por la parte superior, dónde comenzarán a secarse. La capa justo inferior tendrá mayor temperatura y será la de devolatilización, en este caso con un espesor despreciable. En la parte más baja aparecería la capa de reacción de carbono fijo dividida en 2 zonas bien diferenciadas (Figura 1a) [8]. En la parte más baja, recibiendo directamente el aporte de oxígeno tendríamos la capa de oxidación de char (R1). Se puede suponer que esta capa tiene una temperatura tan alta que el mecanismo limitante de reacción es el aporte de oxígeno a la misma.

Los gases liberados en la zona de oxidación deben atravesar toda la columna de combustible con una degradación térmica parcial. Toda esa superficie de combustible contribuirá a la reducción del gas (R2), dando lugar a la zona de reducción de char. A pesar del bajo contenido inicial en volátiles, el gas abandonando el lecho contendrá fracciones cuya combustión deberá ser completada en la fase gaseosa.

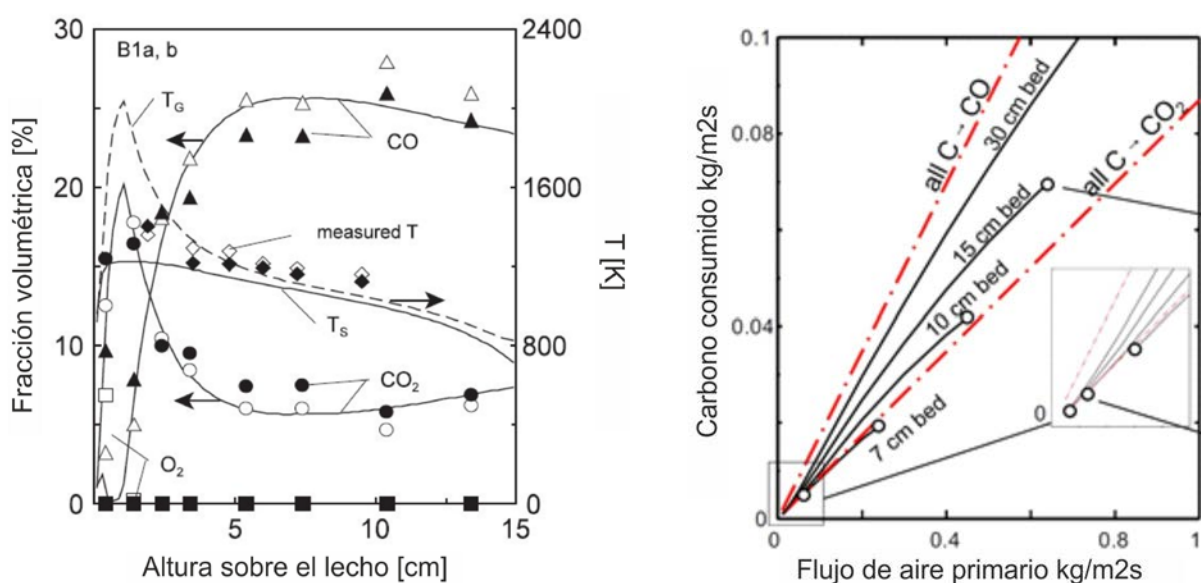


Figura 1.a) Estructura intralecho en overfeed b) Estequiometría del lecho en overfeed

En la Figura 1a se muestran mediciones experimentales de temperatura de gas ( $T_g$ ), temperatura de sólido ( $T_s$ ) así como fracciones volumétricas de  $CO$ ,  $CO_2$  y  $O_2$  obtenidas en el lecho empleando diferentes profundidades de muestreo. Los símbolos vacíos y sólidos diferencian entre 2 condiciones de ensayo diferentes. Superpuestas a los símbolos figuran las líneas de aproximación obtenidas con el modelo propuesto en [8].

Obviando la fase gas, si se analiza la estequiometría del lecho se puede decir que esta depende completamente del espesor de lecho impuesto (Figura 1b). Si se parte de un lecho muy fino (1-2 dp), la zona de reducción de char es inexistente. Los gases de combustión no dispondrán de la superficie necesaria para reducirse, y abandonarán el lecho en forma de  $CO_2$ . Suponemos que en esas condiciones la reacción de carbono sigue una línea estequiométrica de combustión completa a  $CO_2$ . A medida que se aumenta el espesor del lecho, la capa de reducción crecerá. Se pueden lograr entonces mayores ratios de consumo de carbono, pero los gases que abandonan el lecho se registrarán por una combustión incompleta. En el límite, todo el  $CO_2$  sería reducido y únicamente se obtendría  $CO$ , alcanzándose un régimen muy cercano a la gasificación.

Si se modifica el modo suministro de combustible pasando a alimentación inferior (underfeed) el orden de las capas se invierte parcialmente. La capa de oxidación de char estaría ahora en una zona intermedia, dejando por encima la capa de reducción de char en caso de existir. Por debajo, en orden descendente aparecerían la capa de volatilización y la de secado antes de encontrarse el combustible verde o no degradado.

Existen 2 grandes diferencias en ambas configuraciones. La primera tiene que ver con la estequiometría de reacción. En la alimentación inferior el espesor de reacción no se puede imponer, sino que vendrá marcado por la propia evolución y penetración del calor a través de la columna de combustible. La segunda es que ahora el aire que alcanza la zona de oxidación atraviesa primero otras capas y verá modificada su composición, incluyendo vapor de agua y otros volátiles, lo que complicará su uso para la oxidación del carbono fijo. Como resultado, a medida que se aumenta el aire la tasa de combustión variará entre la estequiometría de  $CO$  y  $CO_2$  en función del espesor pero antes del apagado se producirá una reducción bastante brusca de la propagación debida al enfriamiento convectivo. Se perderá la proporcionalidad entre flujo de aire y tasa de combustión.

## 1.2. Combustión de biomasa underfeed

Existen gran cantidad de trabajos semejantes en combustión de biomasa en lecho fijo en quemadores experimentales [4-7]. Entre ellos hay variedad en el modo de alimentación y configuración de aire, aunque la solución más adoptada por sencillez es el uso único de aire primario y consumo por lotes en cuyo caso la alimentación se asemeja a inferior. El comportamiento frente al caudal de aire asumido en este caso es el mostrado en la Figura 2. Para bajos suministros de aire existe una zona donde la velocidad de propagación aumenta proporcional con el oxígeno suministrado. Superado un cierto límite, se pierde esta proporcionalidad y a partir de aquí la tasa se incrementa a menor ritmo, hasta que la energía liberada ya no consigue sostener la propagación y se produce el apagado por enfriamiento convectivo. El comportamiento es semejante al explicado anteriormente para el carbón.

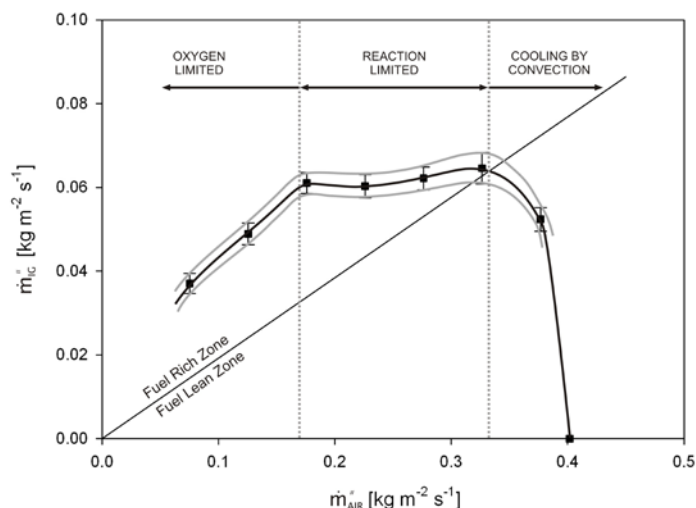


Figura 2. Regímenes de combustión en contracorriente y lecho fijo

## 2. Experimental

En el presente trabajo se pretende analizar el comportamiento del régimen de combustión en función del aire disponible para un lecho fijo pero con aire zonificado. La instalación empleada en este caso tiene alimentación continua y permite regular el aporte de aire entre primario y secundario. En el supuesto de ser necesario también puede trabajar con aire primario únicamente. El combustible empleado será pellet de madera cuya composición que muestra la tabla 1.

Tabla 1. Composición del pellet empleado

Análisis inmediato* (% peso)			
	wp	wp	wp
	1	2	3
Humedad	6.8	6.6	5.8
	5	0	1
Volátiles	68.	66.	66.
	50	65	46
Carbono Fijo	24.	25.	24.
	24	75	60
Cenizas	0.4	1.0	3.1
	1	0	3
Análisis elemental** (% peso)			
C	47.	46.	47.
	43	23	71
H	6.2	6.2	6.1
	2	9	7
N	0.1	2.5	1.9
	4	5	5
O	46.	44.	44.
	21	93	17

\*base húmeda c/cenizas \*\*base seca s/cenizas

### 3. Resultados y discusión

Los repartos de aire empleados habitualmente en calderas de biomasa son del 40 % (masa primario/masa total). En este caso se usaron valores más extremos en cuanto a primario (20-30%) tratando de estudiar su efecto en la posible reducción de emisión de partículas sólidas (PM). La tasa de combustión encontrada se puede ver en la Figura 3. A medida que aumenta el aire total suministrado, también lo hace la velocidad de combustión, sin llegar a alcanzarse el régimen de estabilización ni de apagado por convección. Además la tasa de combustión parece ser mayor cuanto más grande es el reparto hacia aire primario. Este efecto puede verse más claramente en la Figura 4.

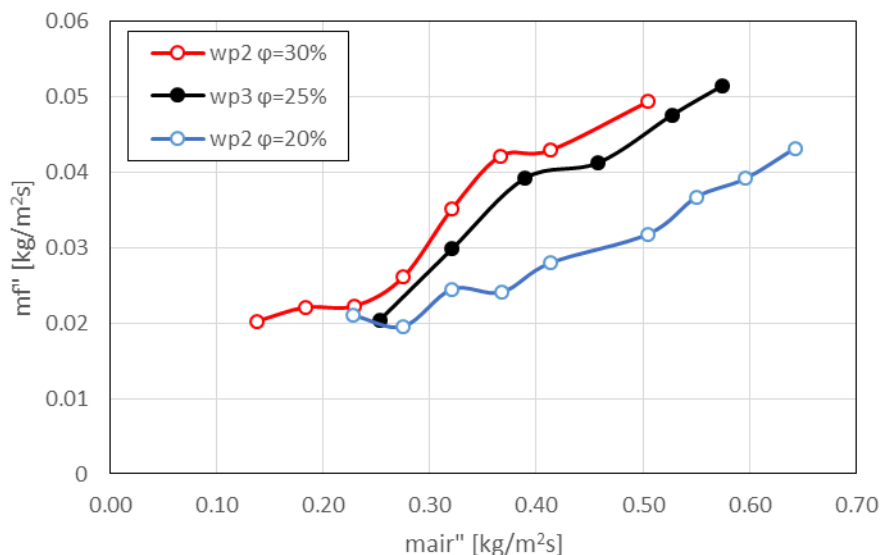


Figura 3. Velocidad de combustión en función del caudal de aire total

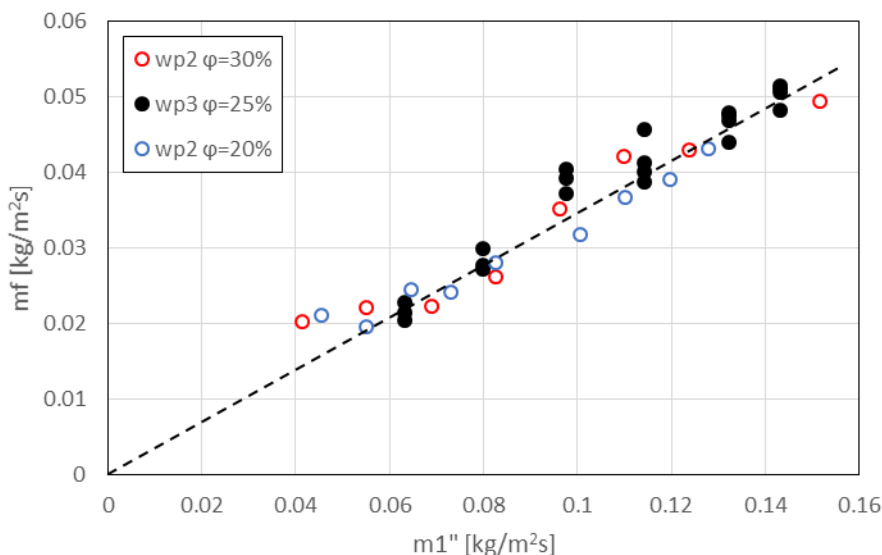


Figura 4. Velocidad de combustión en función del caudal de aire primario

La Figura 4 muestra como con estas tasas de zonificación la velocidad de combustión (potencia liberada) depende exclusivamente del caudal aportado al lecho (primario). Además ambos aumentan de manera proporcional. Esto parece indicar que cualquier incremento de aire primario genera una mayor gasificación de materia en el lecho. Como después existe suficiente aporte de oxígeno en la fase gas para su oxidación gracias al aire secundario, siempre se consigue combustión completa. Expresado en términos de estequiometría del lecho obtendríamos la Figura 5.

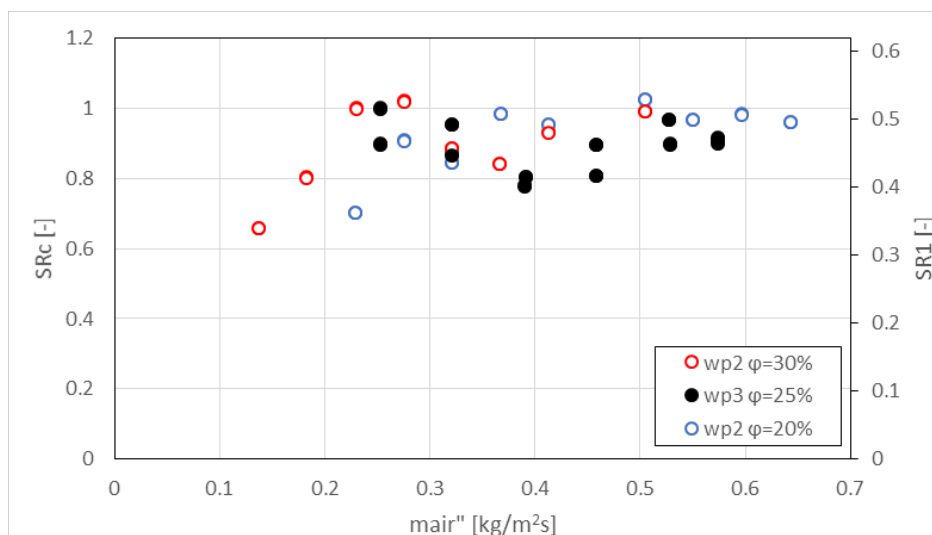


Figura 5. Exceso de aire respecto a char y de partícula sólo con primario

En todo el rango de caudales ensayados durante estos experimentos, la reacción en el lecho parece mantenerse siguiendo la línea de estequiometría de combustión completa  $\text{CO}_2$ . Sin importar el reparto de aire, cualquier aumento de primario representará un incremento en la potencia proporcional. Dicho de otro modo, la tasa de reacción de char está en todo momento limitada por el aporte de oxígeno, y en ningún momento por su cinética de reacción. Ello puede deberse que el aporte de calor recibido por la zona de oxidación de char sea mayor que en otros casos, por lo que su reactividad es mayor. Bien sea porque al haber secundario la combustión en fase gas libera más energía o por la propia configuración del quemador, que al mantener el frente de reacción siempre en la misma zona, sin refrigeración consigue un estado mucho más adiabático, desplazando el enfriamiento convectivo y estirando el rango de aire útil.

#### 4. Conclusiones

Se ha analizado en profundidad las referencias que explican la estructura interna del lecho fijo de combustibles sólidos. En base a ellos se ha conseguido entender el comportamiento del carbón en diferentes configuraciones. Se ha tratado de extender el análisis a un lecho de biomasa con alimentación inferior y zonificación de aire mediante la realización de nuevos ensayos.

En las nuevas pruebas se ha apreciado como la tasa de reacción es muy dependiente del caudal de aire suministrado directamente al lecho (primario). Independiente al reparto de aire empleado, la cantidad de materia gasificada en el lecho y por tanto la potencia liberada en el quemador viene determinada por la dosificación de aire primario. En el rango de trabajo estudiado, la oxidación de char se mantuvo en todo momento limitada por el aporte de oxígeno, ya que su cinética química siempre era elevada debido a su alta temperatura. A lo largo de todo el rango de caudales estudiado, siempre se midió una reacción que seguía la estequiometría de combustión completa de carbono, mientras que en situaciones sin zonificación se alcanzaban otros regímenes y se perdía la proporcionalidad por el enfriamiento convectivo.

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto ENE2012-36405.

#### 6. Referencias

- [1] COOPER, J.; HALLETT, W. L. H. *A numerical model for packed-bed combustion of char particles*. Chemical Engineering Science 2000, vol. 55, pp. 4451-4460.

- [2] VARUNKUMAR, S.; RAJAN, N.K.S.; MUKUNDA, H.S. *Universal flame propagation behavior in packed bed of biomass*. Combustion Science and Technology, 2013, vol. 185(8) pp. 1241-1260
- [3] MAHAPATRA, S.; DASAPPA, S. *Experiments and analysis of propagation front under gasification regimes in a packed bed*. Fuel Processing Technology, 2014, vol. 121 pp.83-90.
- [4] HORTTANAINEN, M.; SAASTAMOINEN J. y SARKOMAA P. (2002). *Operational Limits of Ignition Front Propagation against Airflow in Packed Beds of Different Wood Fuels*. Energy and Fuels, 16 (3):676-686.
- [5] RYU, C.; YANG, Y.B.; KHOR, A.; YATES, N.E.; SHARIFI, V.N. y SWITHEENBANK, J. (2006). *Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I*. Experiments-fuel type, equivalence ratio and particle size. Fuel 85:1039-104.
- [6] PORTEIRO, J.; PATIÑO, D.; COLLAZO, J.; GRANADA, E.; MORAN, J. y MIGUEZ, J.L. (2010). *Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor*. Fuel 89(1):26-35.
- [7] PORTEIRO, J.; PATIÑO, D.; MORAN, J y GRANADA, E. (2010). *Study of a Fixed-Bed Biomass Combustor: Influential Parameters on Ignition Front Propagation Using Parametric Analysis*. Energy Fuels, 24:3890–3897.
- [8] HALLET, W.; GREEN, B.; MACHULA, T. y YANG, Y. (2013). *Packed bed combustion of non-uniformly sized particles*. Chemical Engineering Science 96:1-9.