

---

# *Fragmentación primaria en la combustión en lecho fluidizado de pellets de serrín*

Mario Matiauda<sup>1</sup>, \*Juan B. de León Benítez<sup>2</sup>, Erenio Gonzalez Suarez<sup>2</sup>,  
Nora Freaza<sup>1</sup>, Marta Rivero<sup>1</sup>, Deborah Galpert Cañizares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Argentina

<sup>2</sup>Centro de Análisis de Procesos. Facultad de Química Farmacia. Universidad Central de Las Villas; Carretera a Camajuaní km 5 y 1/2, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

---

*Fragmentation in the primary combustion in fluidized bed of sawdust pellets*

*Fragmentació primària en la combustió en llit fluiditzat de pellets de serradures*

*Recibido: 4 de abril de 2011; revisado: 19 de mayo de 2011; aceptado: 27 de junio de 2011*

## RESUMEN

Parece ser que La combustión en lecho fluidizado tiene buenas perspectivas dentro de las opciones tecnológicas para la generación de energía a partir de un combustible, dada su flexibilidad respecto a los combustibles a emplear como sus posibilidades de operación limpia y eficiente, junto a la posibilidad de cambio de escala.

En este artículo se exponen los resultados alcanzados a escala de planta piloto en el funcionamiento de un reactor de lecho fluidizado en la combustión de pellets de serrín con vistas a su aplicación en el aprovechamiento de los residuos sólidos en el proceso de producción de bioetanol de lignocelulósicos.

**Palabras clave:** combustión, serrín, lecho fluidizado

## SUMMARY

Fluidized bed combustion, with its flexibility in regards to fuels to be used seems promising among other technological options of energy availability from a fuel. The possibilities of clean and efficient operation and scale change in fluidized bed combustion account for the feasibility of this process.

In this paper we present the operation results achieved at pilot plant scale of a bed fluidized reactor in the combustion of sawdust pellets to be applied in the exploitation of solid wastes produced from the production process of bioethanol of lignocelulosics.

**Keywords:** combustion, sawdust, bed fluidized

## RESUM

Sembla que la combustió en llit fluiditzat té bones perspectives dins de les opcions tecnològiques per a la generació d'energia a partir d'un combustible, tant a causa de la seva flexibilitat respecte als combustibles a emprar com de les seves possibilitats d'operació neta i eficient, juntament amb la possibilitat de canvi d'escala.

En aquest article s'exposen els resultats assolits a escala de planta pilot en el funcionament d'un reactor de llit fluiditzat, en la combustió de pellets de serradures, amb vista a la seva aplicació en l'aprofitament dels residus sòlids en el procés de producció de bioetanol de lignocel·lulòsics.

**Paraules claus** combustió, serradures, llit fluiditzat

---

\*Autor para la correspondencia: [juanba@uclv.edu.cu](mailto:juanba@uclv.edu.cu);  
tel. 0534221528

---

## INTRODUCCIÓN

La combustión en lecho fluidizado es el fenómeno por el cual un lecho de partículas sólidas se suspenden en el seno de un gas o un líquido, adquiriendo un comportamiento semejante a un fluido.

Al estar expuesto un lecho fijo de partículas a una corriente de gas ascendente, las partículas individuales tienden a separarse, iniciando la expansión del lecho. Las partículas se mueven erráticamente con una rápida transferencia de calor en el lecho a pesar de la baja conductividad térmica del gas y de las partículas, fenómeno extensivo a la transferencia de masa entre el gas y las partículas. El movimiento resulta ser un mezclado total y estacionario de los materiales del lecho, con una temperatura de lecho homogénea, aún cuando se producen procesos fuertemente exo o endotérmicos. (Saxena, 1994).

En la temperatura de combustión influyen la velocidad de alimentación del combustible, el contenido de humedad del combustible, la velocidad de alimentación del aire de fluidización, el valor calórico del combustible y la temperatura de precalentamiento del combustible. El lecho burbujeante es un reactor virtualmente de mezcla total e isotérmico, que opera de forma similar a un reactor de contacto gas-sólido, donde los sólidos se mezclan permanentemente por el efecto de la fluidización, causando la combustión de las partículas sólidas en el lecho mientras que los volátiles lo hacen sobre el lecho (Anthony, 1995). En el presente artículo se resume el estudio de la combustión de pellets de serrín en lecho fluidizado incluyendo el análisis de las características del cambio de tamaño del combustible en el proceso y su influencia en los parámetros de velocidad y tiempo de combustión, trabajando con dos especies maderables claramente distinguibles: pino elliotii y palo blanco.

## 1. DESARROLLO

### Modelo de combustión.

Se propuso como objetivo la construcción y puesta en funcionamiento de un combustor de lecho fluidizado de pellets de serrín de madera a escala de planta piloto, sobre la base del modelo teórico planteado para la combustión primaria en lecho fluidizado de pellets de serrín.

El modelo teórico de combustión estudia la combustión y liberación de la materia volátil de un pellet de madera de geometría cilíndrica, en lecho fluidizado, bajo condiciones predeterminadas de operación: temperatura del lecho, tamaño de partícula, concentración de oxígeno, además de las características del pellet y parámetros de diseño del lecho. El modelo permite determinar el *tiempo de liberación de volátiles*, correspondiente a pirólisis en primera etapa (pirólisis primaria). La descomposición térmica de estos materiales biomásicos se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas, además de la transferencia de masa y calor. La materia residual carbonizada se evalúa en base al comportamiento de una partícula que quema a densidad constante (Scala, 2006).

Entre las principales suposiciones del modelo se encuentran las siguientes: físicamente se distinguen tres secciones en la unidad: lecho, zona de salpicado y zona libre; el lecho se considera isotérmico; la temperatura del lecho se toma como variable de diseño; la partícula pelletizada se considera homogénea; el material de combustión consiste

básicamente en materia volátil, carbono fijo y cenizas; la materia residual carbonizada sólo contiene carbono fijo y cenizas; la materia volátil se quema fuera de la superficie del lecho (pirólisis secundaria) y por último que los productos gaseosos intervienen en reacciones secundarias una vez que dejan el lecho, a medida que se producen (Scala y Salatino, 2002; B. Leckner, Hanason, Tullin, Borodulya, y Dikalenko, 1999; Leckner, Palchonok, Tullin, Borodulya, y Samuelson, 2000).

Así mismo se considera que la combustión en el lecho está gobernada por la transferencia de calor (perfil térmico descrito por la ecuación de conducción en modelo bidimensional) y la cinética del proceso de combustión sigue el modelo de Arrhenius de primer orden. Se distinguen dos etapas, que se desarrollan secuencialmente: la etapa de devolatilización y la etapa de combustión de la partícula residual. En la etapa de devolatilización el proceso se desarrolla a temperaturas superiores a 500 °C y corresponde a la pirólisis primaria, en ésta el pellet se degrada térmicamente desprendiendo gran cantidad de materia volátil, con transferencia de calor hacia el pellet. Los factores que influyen sobre la devolatilización son el diámetro de la partícula de material combustible, la temperatura del lecho, la cantidad de oxígeno en el gas fluidizante, la velocidad superficial del gas, el diámetro principal de partícula del lecho y el contenido de humedad del combustible (Moreno y Ríos, 2002; Stubington y Davidson, 1981). La segunda etapa, de combustión de la partícula residual, se caracteriza por constituir una reacción exotérmica, con el consecuente incremento de temperatura, donde en una primera fase la combustión de la partícula residual es controlada por la difusión, ocurriendo la combustión en la superficie exterior de la partícula, y una vez que ésta disminuye su tamaño, la velocidad de difusión se vuelve comparable con la velocidad de reacción, conduciendo a una penetración limitada de oxígeno en la partícula residual, hasta que el decrecimiento de la partícula residual es tal que la velocidad de difusión es mucho mayor que la velocidad de reacción química y entonces el oxígeno penetra plenamente en la estructura porosa de la partícula.

### Equipamiento utilizado

Se utiliza un reactor tubular de 45mm de diámetro y 1 m de alto con cámara de aislamiento térmico de fibra cerámica, cubierta de chapa de acero inoxidable. Posee además un sensor de temperatura debajo de la placa de distribución de gases acoplado a un equipo programable controlador de temperaturas. Se utiliza un anemómetro digital para el control de la velocidad del aire a la entrada del reactor, y el calentamiento del aire se realiza empleando resistencias eléctricas.

El reactor y el equipo de control se instalaron en la planta piloto de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (UNaM), instalándose también el circuito de potencia para su alimentación eléctrica así como el conjunto de sensores de temperatura para la medición de temperaturas, figura 1.

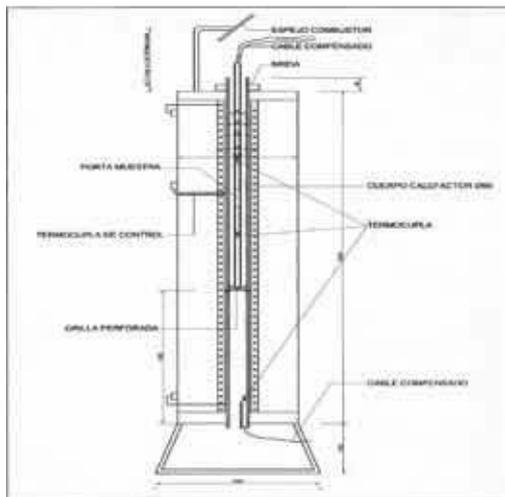


Figura 1. Diagrama del reactor tubular empleado en las experiencias

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### Preparación de las muestras.

Se trabajó con muestras de pino y de palo blanco, de geometría cilíndrica y diámetro promedio  $d_p$  (mm) variando en un rango de 10mm a 12 mm, **tabla 1**.

Tabla 1. Dimensiones de las muestras

$d_p$ (mm)	L (mm)
12	24
12	18
10	18

### Acondicionamiento del lecho

Para condiciones adecuadas de fluidización, se utilizó lecho de arena de granulometría media (0.42 mm) y contenidos de humedad y porosidad controlados; altura media del lecho sin expandir, de 3 a 3.2 cm; inyección de aire con soplador, a velocidad constante, sin modificar la concentración de oxígeno en el aire entrante. La temperatura del lecho se mantuvo aproximadamente en un rango de 800 °C a 850 °C.

### Estudio de la fragmentación primaria en la etapa de devolatilización.

#### Tiempo de devolatilización.

#### Pruebas en el reactor

Se realizaron varias pruebas para determinar el tiempo de liberación de materia volátil ( $t_v$ ), con el fin de caracterizar la etapa de devolatilización, a la cual se refiere la fragmentación primaria, tomando muestras individuales. El tiempo de devolatilización ( $t_v$ ) fue determinado por observación visual desde la parte superior de la columna de fluidización, en el reactor. Se determinó el tiempo ( $t_v$ ) al observarse la formación de la llama, induciendo la formación de carbón y el posterior oscurecimiento de la muestra, con decrecimiento gradual de su tamaño, **tabla 2**.

Tabla 2- Tiempos de devolatilización ( $t_v$ ) (pino)

$d_p/L$ (mm)	$t_v$
12/24	47
12/24	60
12/18	58
10/18	45

Se realizaron ensayos similares al descrito anteriormente, tomando en consideración los mismos parámetros y condiciones de operación, para muestras obtenidas con varillas de *palo blanco*, de densidad: 860,0 (kg/m<sup>3</sup>) y contenido de humedad: 15 % (peso), **tabla 3**

Tabla 3- Tiempos de devolatilización ( $t_v$ ) (*palo blanco*)

$d_p/L$ (mm)	$t_v$ (s)
12/24	68
12/24	67
10/18	47

## 3. RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.

Para los tiempos de devolatilización teóricos, se utilizó una relación de la forma:

$$t_v = \lambda_v (dp)^\phi \quad (1)$$

En la que el tiempo de liberación de volátiles ( $t_v$ ) está expresado en términos de ( $dp$ ) diámetro de la muestra y los parámetros ( $\lambda_v$ ) constante de proporcionalidad y ( $\phi$ ) exponente en la función potencial. La constante de devolatilización ( $\lambda_v$ ) depende del tipo de combustible y de la temperatura del lecho. La determinación de ( $\lambda_v$ ) y de ( $\phi$ ) se efectúa en ajuste con los valores experimentales (gráfico) y/o tabla de valores como aparece en la **tabla 4**.  
Tabla 4- Valores experimentales de ( $\lambda_v$ ) y ( $\phi$ )

Temperatura del Lecho(°K)	873 - 923			973 - 1073			1073 - 1103		
Pellet ( $d_p$ ) (mm)	10	8	6	10	8	6	10	8	6
( $\lambda_v$ )	1.9			1.7			1.5		
( $\phi$ )	1.01			1.08			1.1		

Se compararon los tiempos obtenidos para pellets compactados de serrín de pino y muestras cilíndricas obtenidas de varillas de pino, utilizando la correlación dada por la **ecuación (1)**, así como también los tiempos teóricos y medidos para las muestras cilíndricas, como se muestra en la **figura 2**.

En la figura 2 sale en el eje vertical  $t_v$

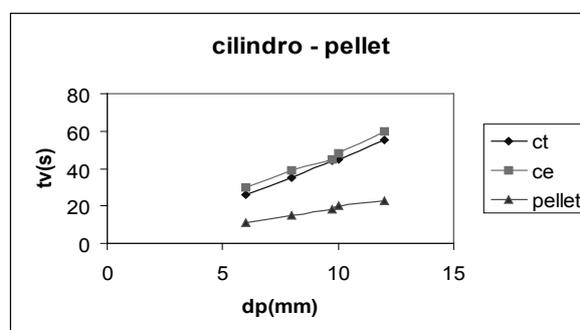


Figura 2. Comparación de los tiempos de desvolatilización donde ct = cilindro (tiempo teórico) y ce = cilindro (tiempo experimental)

Utilizando el valor de  $\phi = 1.1$  ( $T_i = 800$  °C), estimado para la combustión de pellets, se obtiene el valor del parámetro  $\lambda_v = 3.6$  [ $s/mm^\phi$ ] ( $T_i = 830$ °C), para las muestras cilíndricas.

### Sobre la fragmentación primaria

En esta etapa de devolatilización, se realizó la extracción de la muestra residual y posterior evaluación de tipo y número de fragmentos obtenidos.

#### a) Pino

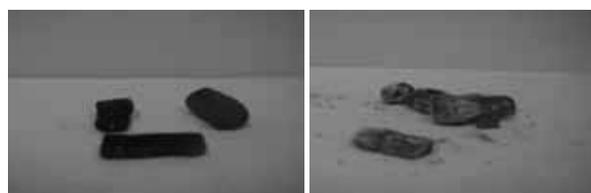
El residuo post-devolatilización consistió en la obtención de un cilindro de dimensiones reducidas, generando muy pocos fragmentos. Un ejemplo se muestra en la **tabla 5**.

**Tabla 4-** Dimensiones del cilindro que conforma el residuo de la post devolatilización

$dp/L(mm)$	$dp^*(mm)$	$L^*(mm)$
12/24	9,5 - 10	18

#### b) Palo blanco

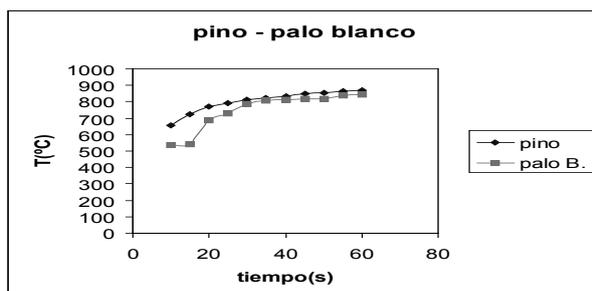
Para una temperatura del lecho  $T_i = 820$ °C, los residuos de palo blanco obtenidos en la etapa de devolatilización presentaron características particulares con relación a los obtenidos para las muestras de pino. En general, el cilindro residual no conservó su estructura, es decir, produjo un número mayor de fragmentos de dimensiones variables. Se observaron también diferencias en el aspecto y consistencia de los residuos de una y otra muestra. Los residuos de pino devolatilizados se mostraron sólidos como "carbones", presentando una coloración de marrón oscuro a negro; los de palo blanco, en cambio, resultaron blanquecinos y de consistencia frágil, similar a la ceniza como se muestra en la **foto 1 y foto 2**.



**Foto - 1:** Residuo de pino **Foto -2:** Residuo de palo blanco.

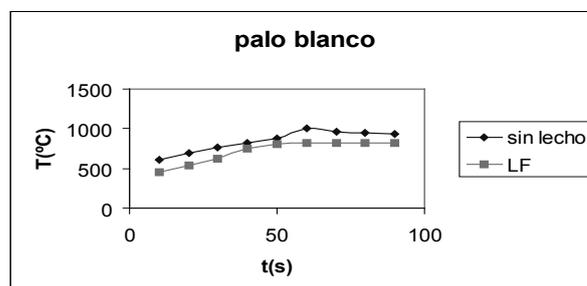
#### c) Evolución térmica en la etapa

Se compararon las evoluciones térmicas para muestras de pino y palo blanco. Para ello se suspendieron los cilindros de ambas muestras en el lecho fluidizado a ( $T_i = 820$ °C) utilizando un sensor de temperatura colocado en el equipo en sentido longitudinal, coincidiendo con el centro de la muestra, y se registraron las temperaturas durante la etapa de devolatilización, **figura 3**.



**Figura 3.** Resultados de evaluaciones térmicas para muestras de pino y palo blanco en el lecho fluidizado a ( $T_i = 820$ °C) en función del tiempo

Se realizaron ensayos similares en el reactor sin lecho fluidizado, usando muestras de pino y de palo blanco  $dp/L = 12/24$  mm, con el fin de determinar el tiempo de devolatilización y caracterizar el residuo devolatilizado, figura 4.



**Figura 4.** Resultados de evaluaciones térmicas para muestras de pino y palo blanco sin lecho fluidizado a ( $T_i = 820$ °C) en función del tiempo

### Cuantificación del fenómeno de fragmentación primaria

La fragmentación primaria se produce de forma inmediata al alimentar las muestras combustibles poniéndolas en contacto con el lecho fluidizado dentro de la columna de fluidización del reactor, debido al corto tiempo transcurrido para devolatilizar la partícula combustible, comparado con el tiempo necesario para la combustión de la materia residual carbonizada, asociado a la fragmentación secundaria. Los resultados de la fragmentación primaria, para las dos muestras utilizadas, se expresan por medio de los siguientes indicadores:

- $p_f$ , que mide la probabilidad de fragmentación primaria; representa el número de fragmentos generado por unidad de partículas combustibles que sufren fragmentación al devolatilizar, dividido por el número total de partículas alimentadas.
- $f_f$ , factor de multiplicación de fragmentación primaria; representa el número de fragmentos generados por unidad de partículas combustibles alimentadas al reactor.
- $d_p^*$ , diámetro medio de las partículas de la materia residual carbonizada después de la devolatilización.

## RESULTADOS

Se ensayó con distintos grupos de muestras, tanto de pino como de palo blanco, alimentándolas al reactor en varios experimentos en lecho fluidizado durante tiempo  $t_v$ . En general, los residuos devolatilizados presentaron características, diferentes al tratarse de pino o de palo blanco. En el primer caso, el carbón devolatilizado se mostró entero en sus tres cuartas partes; en tanto que el palo blanco, se mostró fragmentado.

La **tabla 6** registra los resultados de los experimentos de la fragmentación primaria

**Tabla 6-** Resultados de la fragmentación primaria

Muestra	$f_1$	$dp$ (mm)	$dp^*(mm)$
Pino	1,45	10 - 12	9,5 - 10
Palo blanco	2	10 - 12	6 - 8,5

Donde:

$dp$ , diámetro inicial de las partículas alimentadas (mm)

---

$d_p^*$ , diámetro medio de partículas devolatilizadas (mm)  
 $p_p$ , probabilidad de fragmentación primaria (-)  
 $f_f$ , factor de multiplicación de fragmentación primaria (-).

## CONCLUSIONES

1. La fragmentación primaria ha sido estudiada registrando el número y tamaño de partículas producidas a partir de la muestra combustible después de la devolatilización.
2. Las muestras de pino experimentaron fragmentación moderada dando un factor de multiplicación  $f_f$ , aproximadamente igual a 1,45. Esto conlleva a una reducción del diámetro medio, que podría ocurrir inmediatamente después de inyectar las partículas combustibles en el lecho fluidizado como consecuencia de las tensiones térmicas y sobretensiones provocadas por la liberación de materia volátil; pero, también, esta reducción podría deberse al encogimiento particular.
3. En el caso del palo blanco la fragmentación se cuantifica por un  $f_f$ , aproximadamente igual a 2 o mayor y una  $p_p$ , también mayor, con relación al pino.
4. En general, se produce una reducción radial, próxima al 21% en las muestras de pino y algo mayor para palo blanco, evidenciándose este aspecto después de la devolatilización.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Saxena, S.C; Joshi,C.K."Fluidized bed icineration of waste materials" Progress in Energy and combustion Science, 1994.
2. Anthony, F. J. "Fluidized bed combustion of alternative solid fuels: status, success and problems of the technology". Progress in Energy and Combustion Science, 1995.
3. Scala, F; Salatino,P. "Modelling fluidized bed combustion of high-volatile solid fuels". Chemical Engineering Science. No. 57. pp. 1175-1196, 2002.
4. Scala,F; Chirone, R. "Combustion an Attrition of biomass Chars in a Fluidized Bed". Energy and Fuels, 2006
5. B. Leckner, K. Hansson, C. Tullin, A.V. Borodulya, V. Dikalenko- Kinetics of fluidized bed combustion of wood pellets ,15th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion / Reuter, R.B., Savannah : ASME, 1999
6. B. Leckner, G. Palchonok., C. Tullin, A.V. Borodulya, J. Samuelson- Influence of a attrition on combustion of biomass pellet char, International Energy Agency Workshop, Attrition Phenomena in Fluidized Bed Conversion , Oct 30, University of Salerno, Italy/ Salatino P., University of Salerno, Italy, 2000.
7. Moreno, R.; Rios, .R. "Study of sawdust drying techniques in fluidized bed". Engineering, 2002- 82(3).
8. Stubington, J.F; Davidson,J.F. "Gas phase combustion in fluidized beds". A.I.Ch.E. journal, 27,59, 1981.