

## ESTUDIO DE LA FLUIDIZACIÓN DE MEZCLAS BINARIAS DE BIOMASA-ARENA POR FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

Mariana T. Zambon<sup>a</sup>, Francisco Garrido Makinistian<sup>b</sup>, Germán D. Mazza<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Energías Alternativas, PROBIEN (CONICET-Universidad Nacional del Comahue), Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina, <http://www.probien.gob.ar>

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina.

**Palabras clave:** Gasificación, biomasa, lecho fluidizado, CFD.

**Resumen.** Existe un interés mundial cada vez mayor en el desarrollo de tecnologías que permitan la explotación de fuentes de energía renovable, tanto por razones ambientales como económicas. En este contexto, la biomasa es considerada como una de las alternativas más prometedoras y viables. Los sistemas más avanzados y eficientes de generación de energía partir de biomasa emplean el proceso de gasificación en reactores de lecho fluidizado burbujeante. Estos equipos se caracterizan por presentar un excelente contacto gas-sólido, alta tasa de transferencia de calor y temperatura uniforme y controlable.

Para mejorar la fluidización de las partículas de biomasa comúnmente se agrega un material inerte como arena ó alúmina.

El objetivo de este trabajo comprende el estudio fluidodinámico de mezclas binarias biomasa-arena, fluidizadas con aire, con el fin de lograr un conocimiento exhaustivo de su comportamiento, abarcando los principales indicadores tales como velocidad de mínima fluidización, pérdida de carga y expansión del lecho, para distintas proporciones de arena y biomasa. La interpretación minuciosa y la representación detallada de la fluidodinámica de la operación de estas unidades, es una etapa previa e indispensable para lograr la simulación completa del proceso de gasificación de biomasa en lecho fluidizado.

De las herramientas disponibles actualmente para llevar a cabo el modelado de estos lechos, la fluidodinámica computacional (CFD) es una de las que más posibilidades ofrecen. Gracias al incremento de la capacidad de cómputo que se ha producido en la última década, hoy proporciona un nuevo enfoque para comprender la fluidodinámica y los mecanismos de transferencia predominantes en los flujos multifásicos, y si bien se encuentra aún, para estos sistemas, en la etapa de validación y desarrollo, se esperan importantes avances que permitan optimizar su aplicación con el fin de reducir el tiempo de diseño de nuevos equipos y su costo.

En este estudio se utilizó la versión académica del software ANSYS-Fluent 14.0, basado en el método numérico de los volúmenes finitos. Las simulaciones se llevaron a cabo en estado transitorio. Se aplicó el modelo multifásico Euler-Euler que incorpora la teoría cinética granular para describir el comportamiento del sistema.

La información obtenida a partir de las simulaciones fue contrastada con los valores experimentales para partículas de arena, biomasa y biomasa-arena combinadas en distintas proporciones, observándose una muy buena concordancia.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles, derivados principalmente del gas natural y petróleo se convirtieron desde fines del siglo XIX en la principal fuente de energía primaria del ser humano. Entre las principales desventajas de estas fuentes de energía se cuentan su carácter de no renovable y fundamentalmente los problemas de contaminación ambiental que su uso conlleva.

La madera y otras formas de biomasa incluyendo cosechas energéticas y desechos agrícolas y forestales así como desechos municipales sólidos y lodos secos pelletizados, son algunas de las fuentes viables de energías renovables, con una importancia creciente para satisfacer los requerimientos energéticos y ambientales actuales. La biomasa puede contribuir a la estabilización de las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera en dos formas: mediante la sustitución de combustibles fósiles y por almacenamiento de dióxido de carbono en la vegetación y en el suelo. Otra de las razones para su utilización como fuente alternativa de energía es que aporta una solución al problema del manejo de los voluminosos residuos agrícolas o municipales. La región del Comahue cuenta con grandes cantidades de residuos de biomasa disponibles, con potencial para ser destinados a la generación de energía como por ejemplo los residuos forestales provenientes de aserraderos.

La biomasa es considerada la fuente de energía renovable con el más alto potencial para contribuir a satisfacer las necesidades energéticas tanto de economías desarrolladas como en desarrollo, en el mundo ([Secretaría de Energía Argentina, 2009](#)). Puede ser convertida a energía mediante procesos térmicos y biológicos. Entre las tecnologías de conversión termoquímica, la gasificación de la biomasa ha atraído el mayor interés puesto que ofrece mayor eficiencia comparada con la combustión y la pirólisis. Se puede producir gas combustible a partir de la biomasa y materiales relacionados por oxidación parcial con aire, gasificación con oxígeno/vapor de agua o por gasificación pirolítica, obteniendo una mezcla (syngas) compuesta por: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>), entre otros ([Basu, 2010](#)).

Los sistemas más avanzados y eficientes de generación de energía a partir de biomasa emplean el proceso de gasificación en reactores de lecho fluidizado burbujeante. Estos equipos se caracterizan por presentar un excelente contacto gas-sólido, alta tasa de transferencia de calor y temperatura uniforme y controlable.

Sin embargo, la biomasa no fluidiza con facilidad debido a sus formas peculiares, tamaño y densidad. Para mejorar su fluidización se incorpora un material inerte como arena o alúmina.

Son dos los propósitos perseguidos cuando se fluidiza biomasa junto con arena en un equipo de gasificación. El primero de ellos como ya se dijo es mejorar la fluidización (lograr mayor agitación y formación de burbujas a una menor velocidad del gas) y el segundo es incrementar la transferencia de calor incorporando un sólido con alta capacidad calorífica como la arena.

Como es sabido, el comportamiento fluidodinámico de un lecho fluidizado gas-sólido está fuertemente relacionado con las propiedades de las partículas. En el caso de la mezcla binaria arena-biomasa los componentes presentan propiedades marcadamente diferentes, tanto en forma como en tamaño y densidad. Por esta razón, la fluidización de una mezcla sólida como la mencionada se diferencia marcadamente de la de un sólo componente, que ya ha sido estudiada en considerable profundidad mediante la aplicación de métodos numéricos ([Cornelissen y colab., 2007](#), [Taghipour y colab., 2005](#), [Reuge, 2008](#), [Hosseini y colab, 2010](#)).

Cuando se intenta modelar un lecho fluidizado surgen importantes dificultades como consecuencia del complejo movimiento e interacción de sus dos fases y de la existencia de

una frontera entre fases desconocida y transiente. De las herramientas disponibles actualmente para llevar a cabo el modelado de estos lechos, la fluidodinámica computacional (CFD) es una de las que más posibilidades ofrecen. Gracias al incremento de la capacidad de cómputo que se ha producido en la última década, hoy proporciona un nuevo enfoque para comprender la hidrodinámica y los mecanismos de transferencia predominantes en los flujos multifásicos.

Actualmente, es limitado el avance alcanzado en la investigación de la hidrodinámica de las partículas de biomasa y, si bien se han realizado estudios experimentales sobre la fluidización de mezclas de biomasa y arena en distintas proporciones como en los casos de Zhang y colab. (2011) y Cui y colab. (2007), no se han encontrado en la literatura abierta estudios de simulación del proceso de fluidización de pellets de biomasa aplicando la técnica de (CFD).

El objetivo de este trabajo comprende el estudio del comportamiento fluidodinámico de los lechos fluidizados arena-biomasa-aire, a fin de lograr un conocimiento exhaustivo de su comportamiento. Constituye una etapa previa e indispensable, para lograr la simulación completa, con presencia de la reacción química, en el equipo de gasificación de biomasa de lecho fluidizado.

En particular se evaluará la velocidad de mínima fluidización, pérdida de carga y se analizará cualitativamente la formación de burbujas y expansión del lecho, utilizando como material sólido: arena, biomasa y distintas proporciones de la mezcla de estos dos sólidos.

Para ello se desarrollará una metodología de simulación, utilizando el *software* Ansys-Fluent 14.0, basado en el método numérico de los volúmenes finitos (Patankar, 1980). Se analizarán las distintas alternativas disponibles para llevar a cabo el trabajo y los resultados de las simulaciones serán validados con las mediciones reportadas por Zhang y colab. (2011) sobre un lecho experimental de sección rectangular.

## 2 PROCEDIMIENTO DE RESOLUCIÓN NUMÉRICA

### 2.1 Geometría y mallado

Para desarrollar las simulaciones en 2D se definió como dominio computacional una geometría rectangular de 0.40 m de ancho por 0.76 m de alto. Dichas dimensiones son coincidentes con las de la sección axial de unidad de fluidización utilizada por Zhang y colab. (2011).

La construcción de la geometría que delimita el dominio del problema y el mallado correspondiente fue realizado con los programas Design Modeler y Meshing del *software* ANSYS.

La malla generada es de tipo estructurado. Se efectuó la validación de la misma, con el objeto de determinar el tamaño óptimo que permita representar adecuadamente los fenómenos físicos preponderantes sin incrementar innecesariamente el tiempo de cómputo. La malla definitiva consta de 12160 elementos rectangulares.

Las condiciones de contorno aplicadas en las simulaciones de este trabajo son las siguientes:

- *Velocity Inlet*: en la superficie de entrada de gas al lecho, se estableció la condición de entrada de velocidad definiendo una velocidad superficial uniforme de la fase gas.
- *Pressure Outlet*: en la salida, se estableció la condición de presión de salida con una presión manométrica de 0 Pa, para la mezcla.
- *Wall*: en la pared del lecho, se estableció la condición de pared estacionaria (*Stationary Wall*) y de no deslizamiento (*No Slip*) para todos los casos analizados.

Las partículas sólidas de arena y biomasa a simular presentan las propiedades descriptas en la [Tabla 1](#) y son coincidentes con las empleadas por [Zhang y colab. \(2011\)](#).

|  | <b>Arena</b> | <b>Biomasa</b> |
|--|--------------|----------------|
| Forma  | esférica     | cilíndrica     |
| Diámetro medio (mm)                              | 0.5          | 5              |
| Altura media (mm)                                | ---          | 25             |
| Densidad de la partícula (kg/m <sup>3</sup> )    | 2650         | 385.3          |
| Densidad del seno del lecho (kg/m <sup>3</sup> ) | 1435         | 147.6          |

Tabla 1: Propiedades de las fases sólidas

El análisis fluidodinámico comprende el estudio de la fluidización a distintas velocidades superficiales del gas. A cada velocidad corresponde una simulación, partiendo de la situación de lecho en reposo.

Para evaluar la velocidad de mínima fluidización ( $u_{mf}$ ), velocidad superficial mínima de gas que se requiere para cumplir la condición donde las fuerzas gravitacionales son equiparadas por la fuerza de arrastre vertical ejercida por el fluido, es necesario trazar el gráfico pérdida de carga vs. velocidad superficial del agente fluidizante, partiendo de velocidades muy bajas, inferiores a la de mínima fluidización. Por esta razón las simulaciones deben también incluir la operación del equipo como lecho fijo.

La CFD adopta modelos diferenciados para simular ambos casos, lecho fijo y lecho fluidizado, que serán descriptos en la sección 2.2.

## 2.2 Modelos aplicados en el estudio por CFD

El *software* Ansys-Fluent utiliza para simular un lecho en reposo el modelo de *medio poroso*. Este modelo puede ser utilizado en la simulación de una amplia variedad de problemas de una fase y multifásicos, incluyendo lechos empacados, papeles de filtro, placas perforadas, etc.

El modelo de *medio poroso* adiciona un término fuente de momento a las ecuaciones estándar de flujo de fluidos. Ese término fuente está compuesto por dos términos que representan las pérdidas viscosas y las pérdidas inerciales. Para el caso más simple, el medio poroso homogéneo:

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i \right) \quad (1)$$

Donde  $\alpha$  es la permeabilidad y  $C_2$  el factor de resistencia inercial, datos que deben ser ingresados para la simulación.

En el caso de contar con datos experimentales de  $\Delta P$  y velocidad superficial del medio fluidizante se sugiere obtener los valores de  $\alpha$  y  $C_2$  a partir de dicha información ([Ansys-Fluent, User's Guide, 2011](#)). Siguiendo este procedimiento se obtuvieron los siguientes valores para  $\alpha$  y  $C_2$ :

- Lecho fijo de arena:  $1/\alpha_a = 4.1047 \cdot 10^9 \text{ m}^{-2}$   $C_{2a} = 15.374 \text{ m}^{-1}$
- Lecho fijo de biomasa:  $1/\alpha_b = 1.41 \cdot 10^8 \text{ m}^{-2}$   $C_{2b} = 268 \text{ m}^{-1}$

El modelo de *medio poroso* requiere además información sobre el diámetro de partícula, la densidad del sólido a fluidizar y la porosidad del lecho en reposo:

- Lecho fijo de arena:  $d_a = 0.0005 \text{ m}$ ,  $\rho_a = 2650 \text{ Kg/m}^3$ ,  $\varepsilon_a = 0.423$
- Lecho fijo de biomasa:  $d_{sv} = 0.00682 \text{ m}$ ,  $\rho_b = 385.3 \text{ Kg/m}^3$ ,  $\varepsilon_b = 0.617$

Debido a que las partículas de biomasa presentan geometría cilíndrica, es necesario para desarrollar la simulación adoptar un diámetro equivalente (Kuniiy colab, 1991; Ozahi y colab., 2008). Se calculó el diámetro de Sauter ( $d_{sv}$ ) definido como el diámetro de una esfera que posee la misma relación entre su superficie externa y su volumen que la partícula que se desea caracterizar. Si la superficie externa y el volumen de la partícula son, respectivamente  $S_p$  y  $V_p$ , entonces:

$$\frac{S_p}{V_p} = \frac{\pi d_{sv}^2}{\left(\frac{\pi d_{sv}^3}{6}\right)} = \frac{6}{d_{sv}} \quad (2)$$

Por lo que resulta,

$$d_{sv} = 6 \cdot \frac{V_p}{S_p} \quad (3)$$

Para las mezclas sólidas de arena-biomasa, los parámetros se calcularon en base a una ponderación respecto de fracción volumétrica de los sólidos presentes en el lecho.

Las simulaciones del lecho a bajas velocidades del gas, inferiores a la de mínima fluidización, se llevan a cabo en régimen estacionario. Sin embargo, una vez superada la velocidad de mínima fluidización, estas deben realizarse en régimen no-estacionario como consecuencia de las características intrínsecamente transitorias de dicha operación.

El *software* Ansys-Fluent recomienda utilizar el enfoque Euler-Euler para simular lechos fluidizados. En este modelo las diferentes fases son tratadas matemáticamente como continuas e interpenetrantes. Dado que el volumen de una fase no puede ser ocupado por las otras fases, el modelo introduce el concepto de fracción volumétrica de fase. Estas fracciones volumétricas son asumidas como funciones continuas del tiempo y el espacio y su sumatoria es igual a uno. Las ecuaciones de conservación para cada fase son derivadas para obtener un conjunto de ecuaciones, que tienen una estructura similar para todas las fases. Las ecuaciones de cierre se basan en la teoría cinética de flujos granulares.

Ansys-Fluent cuenta con tres modelos disponibles basados en este enfoque, el modelo de volumen de fluido VOF (*Volume of Fluid*), el modelo de mezcla y el modelo Euleriano, siendo este último el recomendado para la simulación de lechos fluidizados.

Para poder resolver la ecuación de conservación de cantidad de movimiento de un flujo multifásico para la fase  $q$  que interactúa con la fase  $p$  se tiene que,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \cdot \rho_q \cdot \vec{u}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \cdot \rho_q \cdot \vec{u}_q^2) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q \alpha_q \cdot \rho_q + \alpha_q \cdot \rho_q \cdot \vec{g} + \sum_{p=1}^n K_{pq} \cdot (\vec{u}_q - \vec{u}_p) \quad (4)$$

El coeficiente de intercambio sólido-fluido puede ser escrito de la siguiente forma para un sistema en el que interactúa un sólido granular ( $s$ ) cuyo diámetro de partículas es  $d_s$  con un

fluido:

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \cdot \rho_s \cdot f}{\tau_s} \quad (5)$$

donde  $\tau_s$  es el tiempo de relajación para un conjunto de partículas dado por:

$$\tau_s = \frac{\rho_s \cdot d_s^2}{18 \mu_1} \quad (6)$$

Todas las definiciones de  $f$  incluyen una función de arrastre ( $C_D$ ) que depende del número de Reynolds ( $Re_s$ ) definido como:

$$Re_s = \frac{\rho_1 \cdot d_s \left| \vec{u}_s - \vec{u}_1 \right|}{\mu_1} \quad (7)$$

Se han reportado, en la literatura abierta, numerosas correlaciones empíricas para el cálculo del coeficiente de arrastre sólido-fluido. De los modelos disponibles en Ansys-Fluent (Wen-yu, Syamlal-O'Brien y Gidaspow), en este trabajo se ha seleccionado el modelo de Gidaspow para evaluar los coeficientes arena-aire y biomasa-aire (Ansys-Fluent, User's Guide, 2011, Gidaspow, 1992, Reyes y colab.).

Para el caso del coeficiente sólido-sólido correspondiente a la interfase arena-biomasa se utilizó el modelo de Syamlal-O'Brien-Symmetric (Ansys-Fluent, User's Guide, 2011).

### 2.3 Características de las simulaciones

En las simulaciones realizadas para la condición de lecho en reposo se empleó el esquema de resolución SIMPLE para resolver la ecuación de acoplamiento presión-velocidad. La discretización espacial se realizó con el esquema *Standard* para la presión y *First Order Upwind* para el momento. Se verificó que con esquemas de discretización de mayor orden, *Second Order* para la presión y *second Order Upwind* para el momento, se obtienen resultados equivalentes.

Para simular el lecho de partículas a velocidades superiores a la de mínima fluidización las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el esquema de discretización *first order upwind* para las ecuaciones de momento y fracción volumétrica. Para la formulación transiente se utilizó el esquema *first order implicit* y se empleó el esquema *Phase Coupled Simple* para resolver el acoplamiento presión-velocidad.

En la [Tabla 2](#) se presentan los principales datos introducidos en el *software* para llevar a cabo las simulaciones.

Un parámetro importante a definir en las simulaciones de lecho fluidizado es el paso de tiempo. Se realizaron simulaciones con distintos valores de paso de tiempo, resultando ser 0,001 s el más adecuado. Este valor es coincidente con el reportado en los trabajos de [Taghipour \(2005\)](#), [Hulme y colab. \(2005\)](#) y [Azadi \(2010\)](#). El criterio de convergencia seleccionado fue 0,001 siguiendo la recomendación de [Azadi \(2010\)](#). Los restantes parámetros utilizados en las simulaciones de lechos fluidizados se detallan en la [Tabla 3](#).

Las simulaciones se realizaron con la versión Académica de Ansys-Fluent 14.0, en un equipo Intel Core I7 con 8 GB de memoria RAM.

El tiempo de cómputo para cada simulación en la condición de lecho fluidizado fue de 18 horas aproximadamente, para representar la evolución transitoria a lo largo de 8 segundos. Al analizar los resultados se descartaron los datos de los primeros tres segundos, para evitar los efectos iniciales según la recomendación de [Asegehn y colab. \(2011\)](#).

| Descripción                                      | Valor                       |
|--|-----------------------------|
| Diámetro de la partícula de arena                | 0.0005 m                    |
| Diámetro de la partícula de biomasa ( $d_{sv}$ ) | 0.00682 m                   |
| Porosidad inicial del lecho con arena            | 0.423                       |
| Porosidad inicial del lecho con biomasa          | 0.617                       |
| Densidad del gas                                 | 1.225 Kg m <sup>-3</sup>    |
| Viscosidad del gas                               | 1.789 10 <sup>-5</sup> Pa s |
| Velocidad superficial del gas                    | [0.2 – 2] m s <sup>-1</sup> |
| Altura inicial del lecho                         | 0.3 m                       |

Tabla 2: Datos introducidos para desarrollar las simulaciones.

| Parámetro                      | Modelo/valor     |
|--------------------------------|------------------|
| Viscosidad granular            | Gidaspow         |
| Temperatura granular           | Algebraica       |
| Presión de Sólido              | Lun et al.       |
| Distribución radial            | Lun et al.       |
| Límite de empaquetamiento      | 0.63             |
| Coefficiente de restitución    | 0.9              |
| Tamaño de paso de tiempo       | 0.001 s          |
| Cantidad máxima de iteraciones | 30               |
| Criterio de convergencia       | 10 <sup>-3</sup> |

Tabla 3: Principales parámetros utilizados para simular lechos fluidizados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados obtenidos por CFD a partir de las simulaciones realizadas utilizando partículas sólidas de arena, biomasa y mezclas arena-biomasa.

Para cada uno de estos casos se muestran los resultados de pérdida de carga vs. velocidad de agente fluidizante, imágenes de fracción volumétrica de sólidos en el lecho que permiten apreciar cualitativamente el estado de fluidización y finalmente, la correspondiente comparación con la información experimental reportada por [Zhang y colab. \(2011\)](#).

Se cuenta con información experimental sólo para la mezcla arena-biomasa al 50% en volumen. Para las restantes mezclas se realiza un análisis cualitativo de los resultados.

#### 3.1 Lecho de partículas de arena

Para evaluar la velocidad de mínima fluidización del lecho de arena se realizaron las simulaciones por CFD para las situaciones de lecho en reposo (según el esquema de la Figura 1.a) y lecho fluidizado (Figura 1.b). Las condiciones de contorno utilizadas fueron descriptas en la sección 2.1.

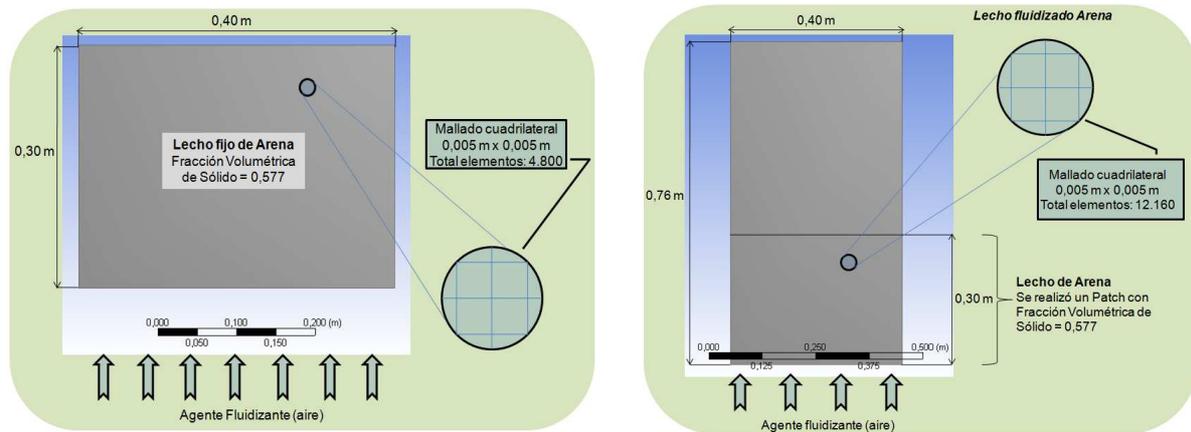


Figura 1: Dominio computacional. a: Lecho fijo arena/aire. b: Lecho lecho fluidizado arena/aire.

En la **Figura 2** se presentan los resultados obtenidos. La velocidad de mínima fluidización se calcula gráficamente a partir de la intersección de las líneas de  $\Delta P$  vs. velocidad superficial del gas ( $u_s$ ) de las regiones de lecho fijo y lecho fluidizado.

Los valores obtenidos a partir de las simulaciones fueron contrastados con los datos experimentales reportados por **Zhang y colab., 2011** y se los presenta en la **Tabla 4**.

Puede observarse que los errores relativos para  $\Delta P$  y velocidad mínima de fluidización son inferiores al 1%, lo que indica una muy buena concordancia.

El análisis cuantitativo realizado se complementa con la observación cualitativa de la formación de burbujas en el lecho a distintas velocidades del agente fluidizante, por medio de los diagramas de contorno obtenidos por CFD (**Figura 3**) y su comparación con fotos experimentales (**Figura 4**). Se puede visualizar en las imágenes un incremento en el tamaño de las burbujas y una mayor agitación al aumentar la velocidad del gas, lo cual se corresponde con lo apreciado en las fotografías experimentales. Cabe aclarar que en las imágenes fotográficas no se informa la velocidad del agente fluidizante que corresponde a cada cuadro, imposibilitándose, por esa razón, la comparación directa a una velocidad determinada.

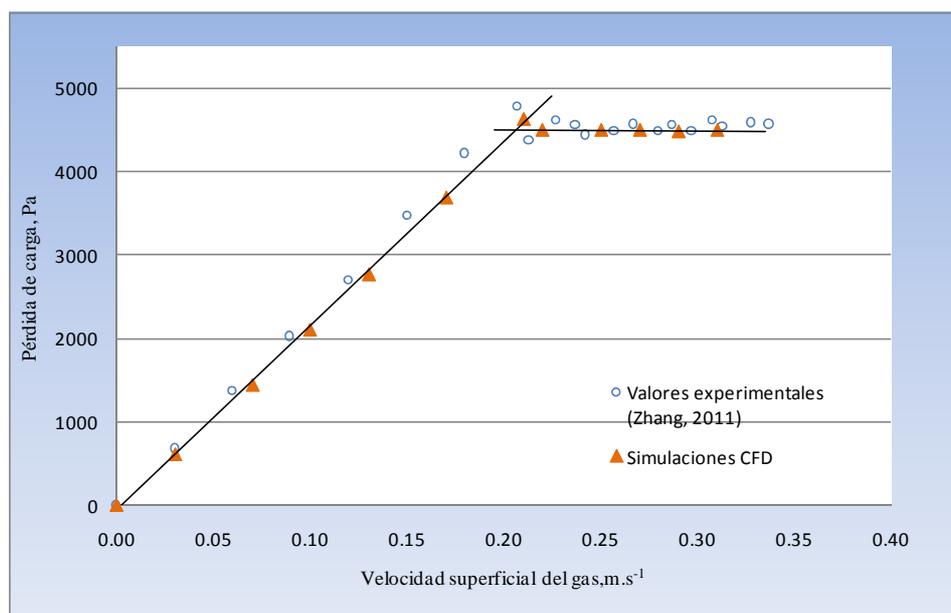
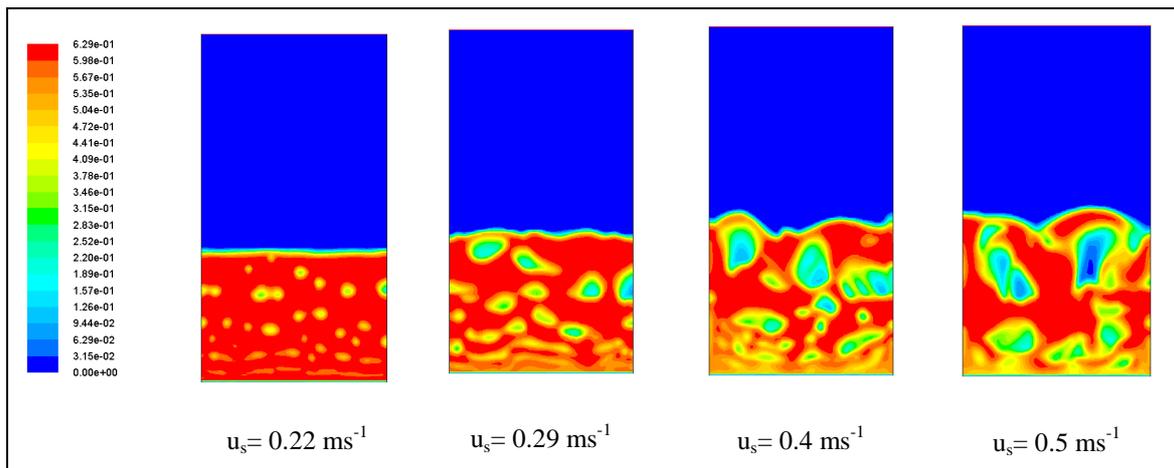


Figura 2:  $\Delta P$  vs.  $u_s$ . Lecho arena/aire.

|  | CFD   | Experimental | Error % |
|--|-------|--------------|---------|
| Velocidad de mínima fluidización ( $\text{m.s}^{-1}$ ) | 0.209 | 0.207        | 0.9     |
| $\Delta P$ de zona de lecho fluidizado promedio (Pa)   | 4494  | 4530         | 0.8     |

Tabla 4: Simulación del lecho arena/aire. Comparación con valores experimentales.

Figura 3: Imágenes de la fracción volumétrica del sólido, para  $v_s = 0.22, 0.29, 0.4$  y  $0.5$  m/sFigura 4: Fluidización del lecho de arena. Incremento de  $u_s$  de izquierda a derecha (Zhang y colab.,2011).

### 3.2 Lecho de partículas de Biomasa

La fluidización de biomasa presenta un comportamiento más complejo que el observado en el caso de la arena. En la [Figura 5](#) se pueden apreciar las siguientes características sobresalientes:

- En la zona de lecho en reposo de la [Figura 5](#) existen dos pendientes bien definidas. Una vez alcanzada la velocidad de  $0,383 \text{ m.s}^{-1}$  se observa un cambio de pendiente, que se produce al surgir en el lecho canalizaciones entre las partículas de biomasa, generando una leve reducción de la pérdida de carga.
- Al fluidizarse el lecho se produce una disminución en la pérdida de carga significativa. La magnitud de esta pérdida de carga tiene relación con las fuerzas de cohesión entre las

partículas en el lecho fijo, que dependen de la naturaleza y de aspectos geométricos de las partículas. Cuando la cohesión es vencida, el lecho se expande y comienza la fluidización, que va acompañada por una disminución de la pérdida de carga.

- La velocidad mínima de fluidización experimental no se determina para este caso siguiendo el procedimiento utilizado para la arena, sino que se le asigna el valor de la velocidad a la cual se produce el  $\Delta P$  máximo (Zhang y colab., 2011).

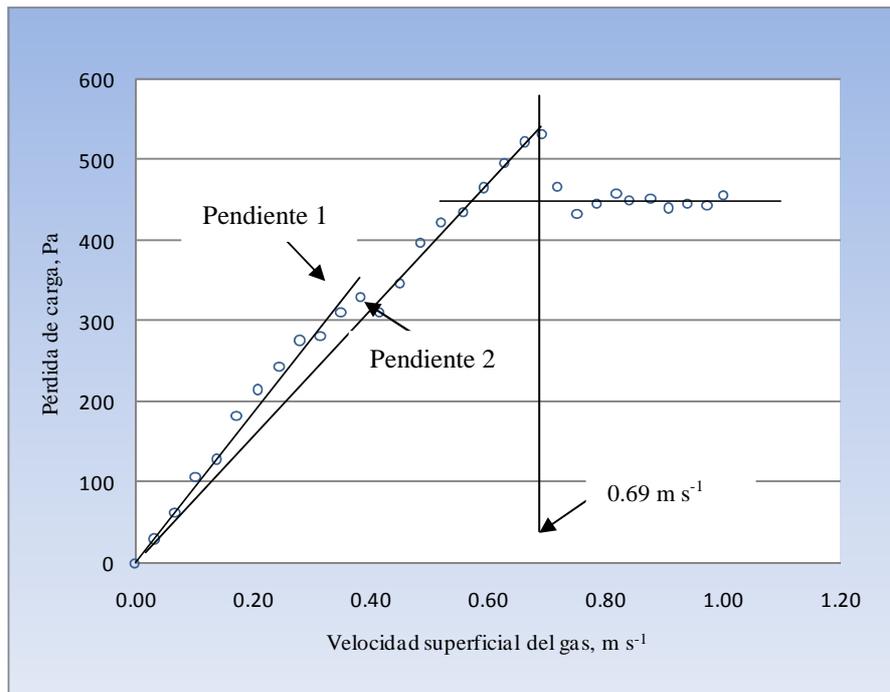


Figura 5:  $\Delta P$  vs.  $u_s$ . Lecho de biomasa. (Zhang y colab., 2011).

Para evaluar la velocidad de mínima fluidización del par biomasa-aire, se realizaron simulaciones por CFD para los estados de lecho en reposo y fluidizado según los esquemas representados en las Figuras 6.a y 6.b respectivamente.

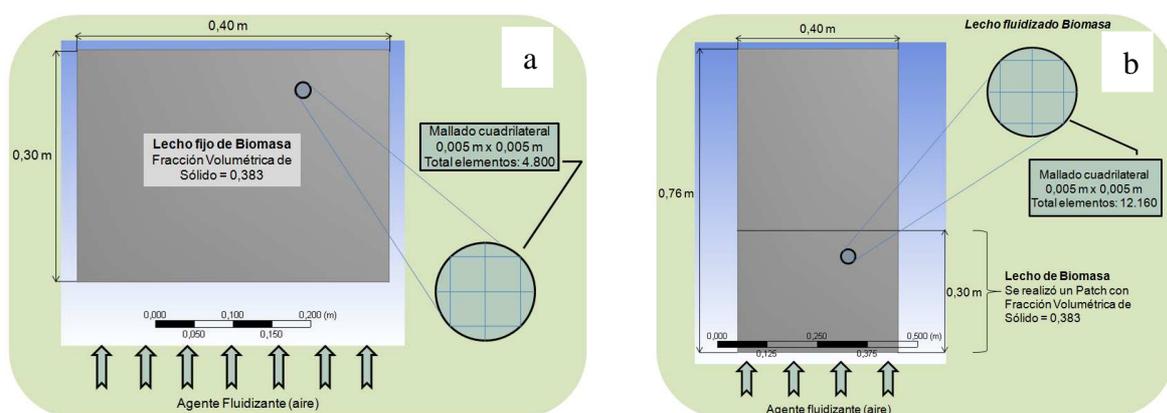


Figura 6: Dominio computacional . a: Lecho fijo biomasa/aire. b: Lecho lecho fluidizado biomasa/aire.

La Figura 7 muestra los resultados de las simulaciones para conjuntamente con los datos experimentales reportados por Zhang y colab. (2011).

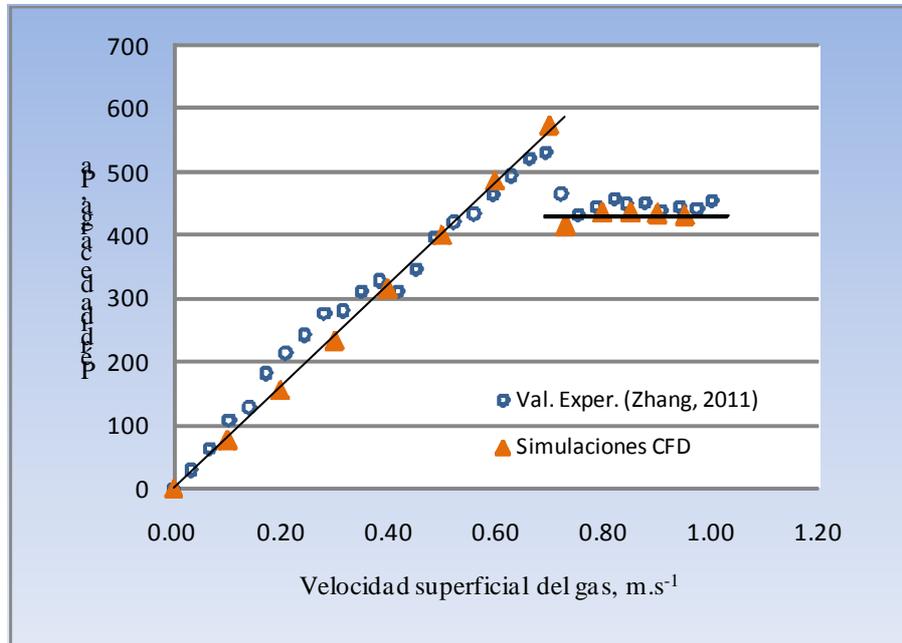


Figura 7:  $\Delta P$  lecho vs.  $u_s$ , Lecho de biomasa.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y los valores experimentales se resumen en la Tabla 5:

|   | CFD | Experimental | Error % |
|---|-----|--------------|---------|
| Velocidad de mínima fluidización ( $m.s^{-1}$ ) | 0.7 | 0.6911       | 1.3     |
| DP lecho fluidizado promedio (Pa)               | 433 | 449          | 3.5     |

Tabla 5: Simulación del lecho biomasa/aire. Comparación con valores experimentales.

Puede observarse en la Tabla 5 que, si bien se produce un incremento de los errores con respecto al caso arena-aire, los resultados son muy satisfactorios.

Para realizar la determinación de la velocidad mínima de fluidización por CFD, se optó por partir de una velocidad del agente fluidizante elevada (en la que se observara la presencia de burbujas) y luego ir reduciendo dicha velocidad hasta no observar la formación de burbujas y/o agitación en las imágenes del lecho obtenidas con Ansys-Fluent, tomando esta última velocidad como la de mínima fluidización. Este procedimiento alternativo se utilizó en reemplazo del método de la intersección de las rectas  $\Delta P$  vs.  $u_s$  del aire, de las regiones de lecho fijo y lecho fluidizado aplicado al par arena-aire.

La Figura 8 muestra las fracciones volumétricas de biomasa. A la velocidad superficial del aire de 0.8 m/s se observa la formación de una zona de baja densidad de sólido en color amarillo, al disminuir la velocidad del aire a 0.75 m/s su tamaño disminuye y finalmente se puede apreciar la desaparición de agitación y burbujas a 0.70 m/s, valor asignado a la velocidad de mínima fluidización calculada por CFD.

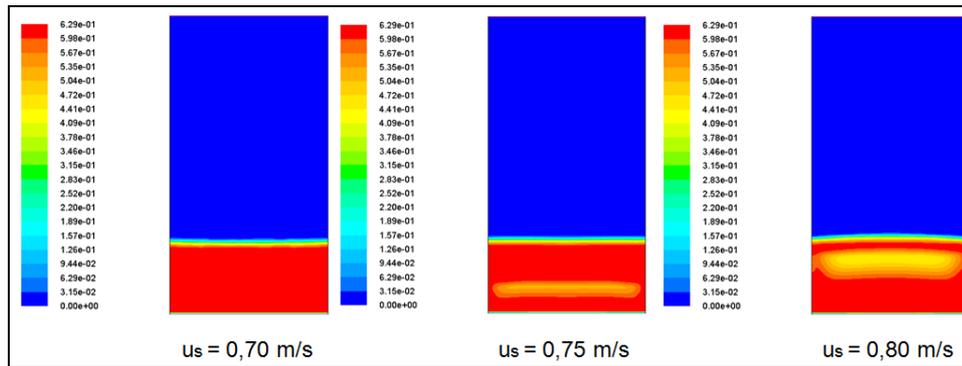


Figura 8. Fracción de volumen de sólido, evaluada por CFD.

La Figura 9 permite analizar cualitativamente la formación de burbujas y agitación en el lecho, a distintas velocidades y efectuar una comparación con imágenes fotográficas experimentales (Figura 10).

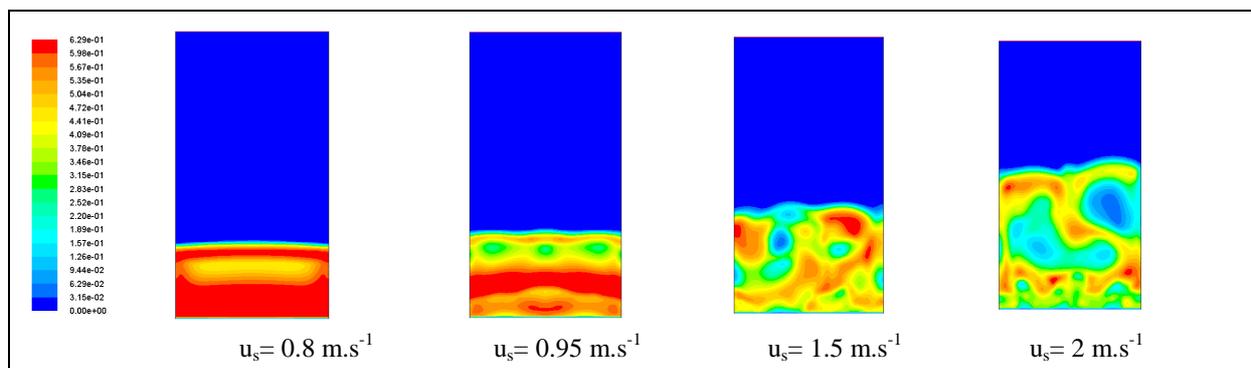


Figura 9: Fracción volumétrica de sólidos a distintas velocidades del gas



Figura 10: Fluidización del lecho de biomasa. Incremento de  $u_s$  de izquierda a derecha (Zhang y colab., 2011).

Se puede visualizar, en las imágenes obtenidas por CFD, una mayor agitación al aumentar la velocidad del agente fluidizante, lo cual se corresponde con lo apreciado en las fotos experimentales. Se puede observar a altas velocidades la formación de burbujas de gran tamaño. Cabe aclarar que, al igual que en el caso del lecho de arena en las fotos experimentales no se indica la velocidad del agente fluidizante, lo que impide realizar una comparación directa a cada velocidad.

### 3.3 Lecho binario Arena-bionasa ( $X_v = 0.5$ )

Se llevó a cabo la simulación de un lecho binario biomasa-arena con fracción volumétrica ( $X_v$ ) de arena igual a 0.5. El lecho fijo se simuló según el esquema de la Figura 11.a y el lecho fluidizado según el esquema de la Figura 11.b.

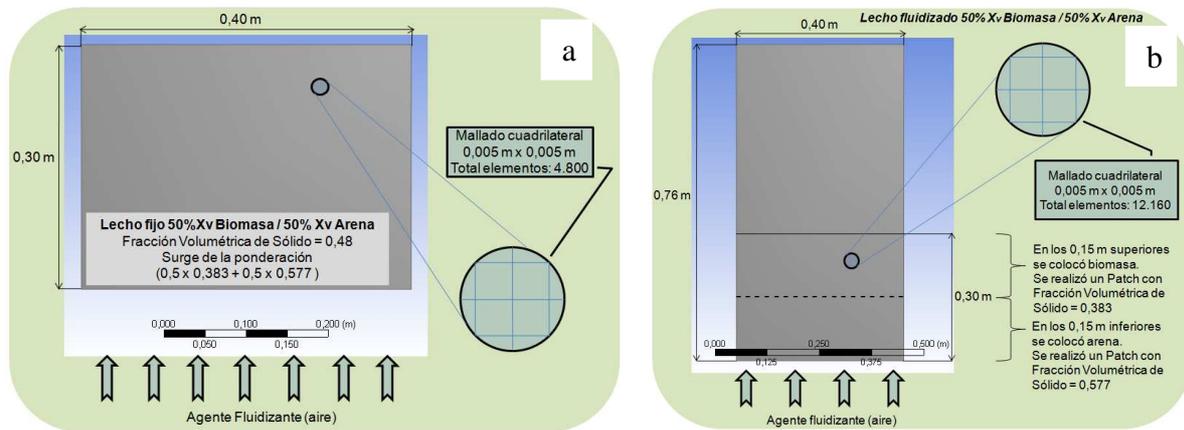


Figura 11: Dominio computacional . a: Lecho fijo Arena-biomasa. b: Lecho lecho fluidizado Arena-biomasa

Como punto de partida del cálculo del lecho fluidizado, se inicializó la simulación asignándole al lecho (por medio de un patch) una altura total de 0.3 m conformada por arena en la mitad inferior y biomasa en la zona superior (Figura 14). Una vez fluidizado el lecho, ambas partículas sólidas se mezclan.

En la Figura 12 se presentan los resultados de  $\Delta p$  calculados por CFD a distintas velocidades superficiales del gas, tanto para la etapa de lecho en reposo como para la región de lecho fluidizado, conjuntamente con los valores experimentales reportados por Zhang y colab., 2011.

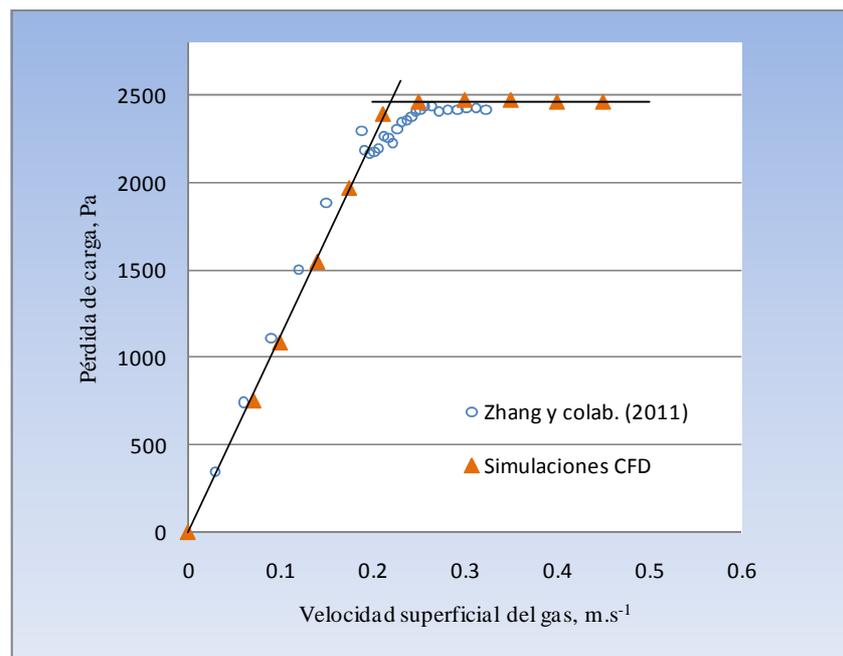


Figura 12:  $\Delta p$  vs.  $u_s$ . Lecho biomasa-arena ( $X_v=50\%$ )

En la *Tabla 6* se comparan los valores obtenidos por CFD con los datos experimentales obtenidos por *Zhang y colab. (2011)*. Se puede observar una muy buena concordancia.

|   | CFD   | Experimental | Error % |
|---|-------|--------------|---------|
| <b>Velocidad de mínima fluidización (<math>m.s^{-1}</math>)</b> | 0.221 | 0.219        | 0.2     |
| <b>DP lecho fluidizado promedio (Pa)</b>                        | 2.464 | 2.42         | 1.8     |

Tabla 6: Simulación del lecho biomasa-arena,  $X_v=0.5$ . Comparación con valores experimentales.

Las *Figuras 13,14 y 15*, obtenidas a partir de las simulaciones, muestran los dos sólidos, arena y biomasa por separado, en la situación inicial de lecho en reposo y a dos velocidades superficiales del gas diferentes. Se puede visualizar en ellas, el incremento en el tamaño de las burbujas y una mayor agitación y distribución de los sólidos en el volumen del lecho al aumentar la velocidad del agente fluidizante, lo cual se corresponde con lo apreciado en las fotos experimentales (*Figura 16*). Cabe aclarar que, al igual que en las imágenes fotográficas de la *Figura 10*, los autores no indican la velocidad del aire en cada imagen.

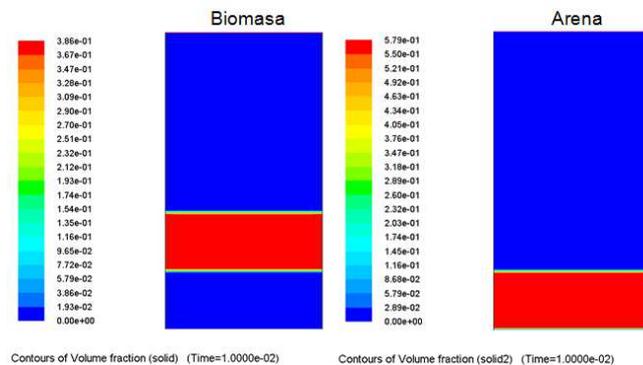


Figura 13: Fracciones volumétricas de biomasa y arena. Composición:  $X_v = 0.5$

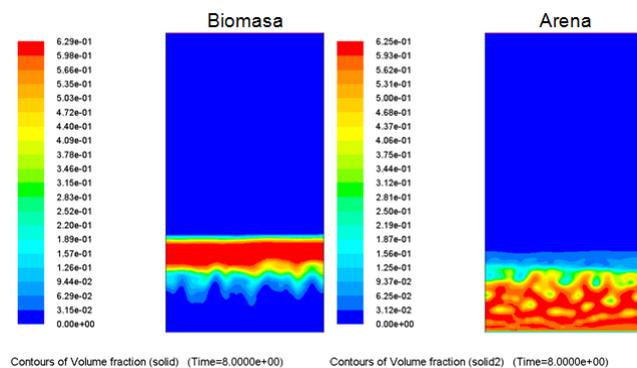


Figura 14. Fracciones volumétricas de biomasa y arena,  $u_s = 0.30 m.s^{-1}$

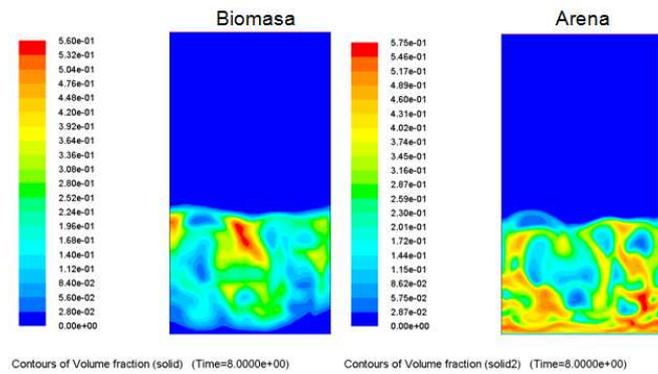


Figura 15: Fracciones volumétricas de biomasa y arena,  $u_s = 0.45 \text{ m.s}^{-1}$



Figura 16: Fluidización del lecho biomasa-arena,  $X_v = 0.5$ . Incremento de  $u_s$  de izquierda a derecha (Zhang y colab., 2011).

En relación a la expansión del lecho, se puede apreciar en las imágenes de las fracciones volumétricas de sólido de la Figura 17, cómo ambos sólidos se mezclan y se expanden superando el nivel del lecho en reposo, a medida que se aumenta la velocidad superficial del aire. Dicha expansión es observada también en la Figura 16. Adicionalmente se observa la formación de burbujas cuyo tamaño crece con la velocidad.

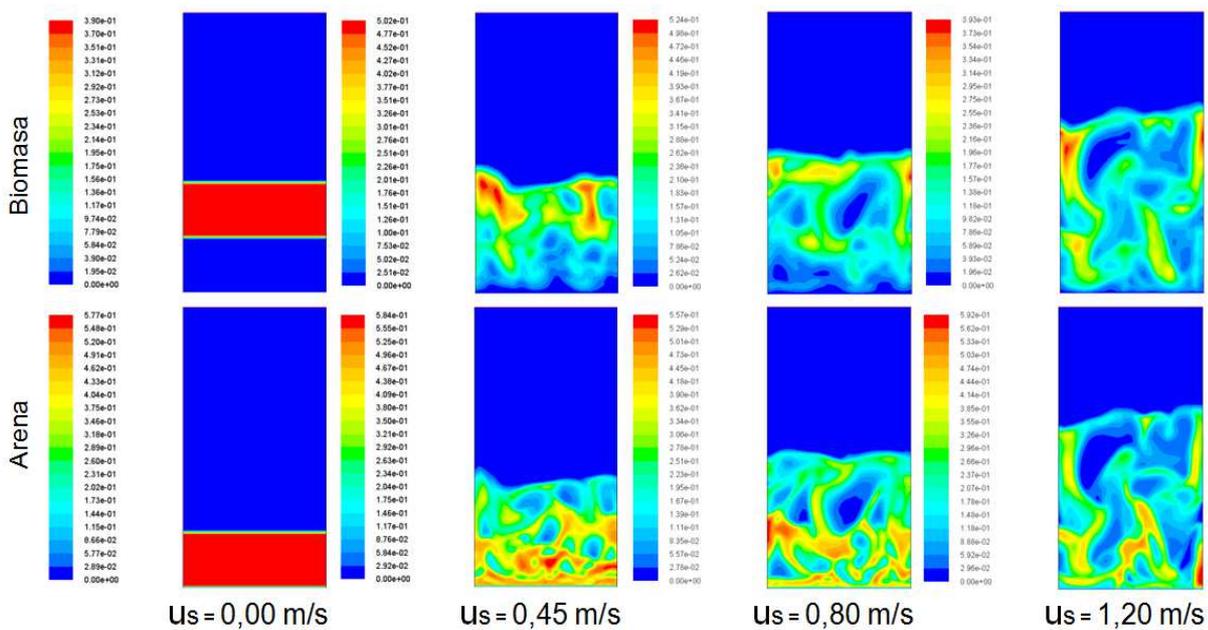


Figura 17: Fluidización del lecho 50% biomasa-50% arena. Expansión del lecho a distintas  $u_s$ .

### 3.4 Lecho binarios arena-biomasa con múltiples composiciones

Se realizaron simulaciones por CFD de las cuatro proporciones de mezcla arena-biomasa que se detallan en la [Tabla 7](#).

| Mezcla | X <sub>v</sub> arena | X <sub>g</sub> arena |
|--------|----------------------|----------------------|
| 1      | 0.15                 | 0.64                 |
| 2      | 0.30                 | 0.81                 |
| 4      | 0.65                 | 0.95                 |
| 5      | 0.80                 | 0.97                 |

Tabla 7: Mezclas arena-biomasa simuladas por CFD

Es importante mencionar que si bien no se cuenta con información experimental para hacer una comparación directa de los resultados para estas mezclas, se considera que los resultados presentados en las secciones anteriores, permiten afirmar que la metodología desarrollada es válida para simular por CFD lechos fluidizados constituidos por partículas sólidas de arena, biomasa y mezclas binarias arena-biomasa.

En la [Figura 18](#), se resumen los resultados obtenidos.

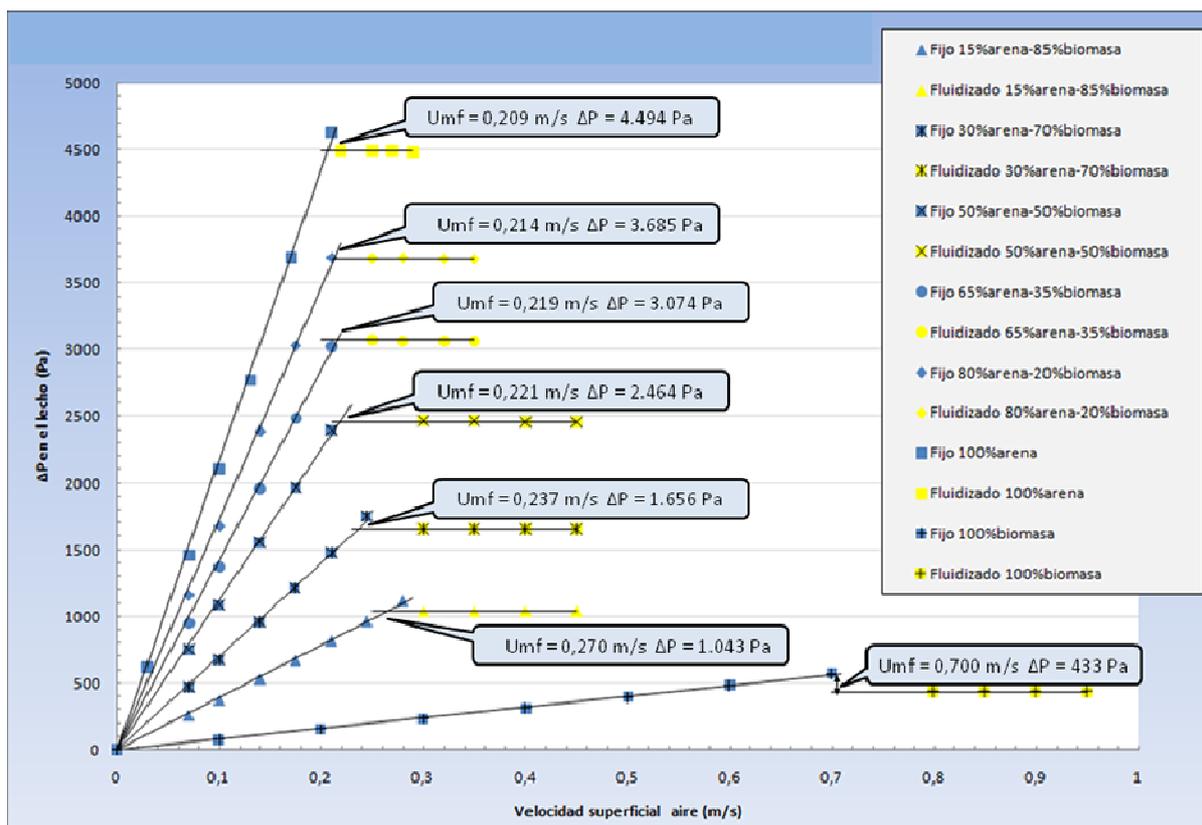


Figura 18: Resumen de resultados  $\Delta P$  vs.  $v_s$  para distintas mezclas arena-biomasa (expresadas en V/V %)

En la [Figura 18](#) puede observarse que, al aumentar la fracción volumétrica de arena, se hace más pronunciada la pendiente de la línea de tendencia  $\Delta P$  vs.  $v_s$  correspondiente a la zona de lecho en reposo, disminuye la velocidad mínima de fluidización y se incrementa el valor de la pérdida de carga media de la zona de lecho fluidizado.

Todos los resultados obtenidos para las mezclas binarias estudiadas se encuentran

comprendidos entre los valores extremos calculados para los lechos de biomasa y arena como fases sólidas únicas presentes en el lecho.

Las mezclas arena-biomasa de mayor interés por su aplicación en los equipos de gasificación por lecho fluidizado son las comprendidas entre 0.5 y 5% en peso de combustible sólido (Singh, 2013), lo que equivale a mezclas con una proporción de arena superior al 60 % en volumen.

Finalmente, es importante destacar la marcada disminución que se produce en el valor de la velocidad de mínima fluidización de la biomasa cuando se le incorpora una pequeña proporción de arena. La velocidad de mínima fluidización para la biomasa sola presenta un valor de  $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , al incorporarle arena, con  $X_v \text{ arena} = 0.15$ , esta sufre una disminución del 60% alcanzando un valor de  $0.27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Como puede observarse en la Figura 18, al continuar incrementando la proporción de arena, la  $u_{mf}$  sigue disminuyendo pero en una proporciones significativamente menores.

#### 4 CONCLUSIONES

Se llevó a cabo el estudio fluidodinámico de lechos de mezclas binarias arena-biomasa, utilizando aire como agente fluidizante. La herramienta utilizada en este trabajo fue el software de CFD Ansys-Fluent.

Para desarrollar las simulaciones se partió de la arena como el caso más simple, luego se trabajó con partículas de biomasa y, sobre la base de los resultados obtenidos, se avanzó hacia los casos más complejos de mezclas binarias arena-biomasa (en total se simularon cinco mezclas binarias).

Se validaron los resultados de las simulaciones contrastando los valores calculados de  $\Delta P$  (tanto en la zona de lecho fijo como en la zona de lecho fluidizado) y de velocidad mínima de fluidización, con los resultados experimentales reportados por Zhang y colab. (2011). Se obtuvieron errores relativos satisfactorios inferiores al 3,5%.

Se observaron resultados cualitativamente coherentes en relación el estado de agitación, expansión y formación de burbujas de los distintos lechos fluidizados. Esto se pudo analizar mediante la comparación de los diagramas de contorno de las fracciones de sólido generadas a partir de los resultados de las simulaciones y las imágenes experimentales disponibles.

Se verificó el potencial que posee Ansys-Fluent como herramienta de trabajo para simular el comportamiento fluidodinámico de lechos fluidizados binarios, desarrollándose un método de simulación válido para la mezcla binaria arena-biomasa fluidizada por aire.

#### RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el financiamiento compartido de la Universidad Nacional del Comahue y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

#### NOMENCLATURA

|          |   |
|----------|---|
| $C_D$    | función de arrastre, (adimensional)   |
| $d_s$    | diámetro de las partículas de la fase sólida, m   |
| $d_{sv}$ | diámetro de Sauter, m   |
| $f$      | relación entre $K_{pq}$ y la función de arrastre, (adimensional)  |
| $K_{pq}$ | coeficiente de intercambio de cantidad de movimiento en la interfase p-q, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| $Re_s$   | número de Reynolds de partícula, (adimensional)   |

|           |  |
|-----------|--|
| $u_s$     | velocidad superficial del aire, $m.s^{-1}$   |
| $u_{mf}$  | velocidad de mínima fluidización, $m.s^{-1}$ |
| $\vec{v}$ | velocidad de fase, $m.s^{-1}$                |
| $X_g$     | fracción másica, (adimensional)              |
| $X_v$     | fracción volumétrica, (adimensional)         |

### Símbolos griegos

|                |   |
|----------------|---|
| $\alpha$       | fracción volumétrica de fase, (adimensional)                  |
| $\epsilon$     | porosidad del lecho fluidizado, (adimensional)                |
| $\mu$          | viscosidad, $kg.m^{-1}.s^{-1}$                                |
| $\rho$         | densidad de fase, $kg.m^{-3}$                                 |
| $\tau_s$       | tiempo de relajación para un conjunto de partículas, s        |
| $\bar{\tau}_q$ | tensor esfuerzo-deformación para la fase q, $Pa.lb_f.ft^{-2}$ |
| $\Delta P$     | pérdida de carga del lecho fluidizado, Pa                     |

### Sub-índices

|   |               |
|---|---------------|
| g | fase gas      |
| p | fase genérica |
| q | fase genérica |
| s | fase sólida   |
| a | arena         |
| b | biomasa       |

### REFERENCIAS

- Anslys Inc., Anslys Fluent 14.0 User's Guide, 2011
- Asegehegn, T.W., Schreiber, M. and H.J. Krautz, Numerical Study of Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds Hydrodynamics: Influence of Immersed Horizontal Tubes and Data Analysis. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 9:A16, 2011.
- Azadi, M., Multi-Fluid Eulerian Modeling of Limestone Particles Elutriation from a Binary Mixture in a Gas-Solid Fluidized Bed. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2010.
- Cammarata, L., Lettieri, P., Giorgio, D., Micale, M., and D. Colman, 2D and 3D CFD Simulations of Bubbling Fluidized Beds Using Eulerian-Eulerian Models, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 1, A48, 2003.
- Cornelissen, J.T., Taghipour, F., Escudí, R., Ellis, N. and J.R. Grace, CFD modeling of a liquid-solid fluidized bed, *Chemical Engineering Science*, 62: 6334-6348, 2007.
- Cui, H. and J. Grace, Fluidization of biomass particles; a review of experimental multiphase flow aspects, *Chemical Engineering Science*, 62 1-2: 45-55, 2007.
- Gidaspow, D., Bezburuah, R., and Ding, J., Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In *Fluidization VII, Proceedings of the 7<sup>th</sup> Engineering Foundation Conference on Fluidization*, pages 75-82, 1992.
- Hosseini, S.H., Ahmadi, G., Rahimi, R., Zivdar, M. and Esfahany, M.N., CFD studies of solids hold-up distribution and circulation patterns in gas-solid fluidized beds. *Powder Technology*, 200: 201-215, 2010.

- Hulme, I., Clavelle, E., van der Lee, L. and A. Kantzas, CFD Modeling and Validation of Bubble Properties for a Bubbling Fluidized Bed, *Ind. Eng. Chem.*, 44: 4254-4266, 2005.
- Kunii, D. and O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*, Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.
- Ozahi, E., Gundogdu, M.Y. and M. Carpinlioglu, A Modification on Ergun's Correlation for Use in Cylindrical Packed Beds With Non-spherical Particles, *Advanced Powder technology*, 19: 369-381, 2008.
- Basu, P., *Biomass Gasification and Pyrolysis, Practical Design and Theory*, Elsevier Inc., United States, 2010.
- Patankar, S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, Nueva York, 1980.
- Reyes Urrutia A., Q. Falcoz, M. Zambon, G. Mazza, D. Gauthier and G. Flamant, Incineración de residuos urbanos en lecho fluidizado. Evaluación de la velocidad de desprendimiento de metales pesados mediante modelos fenomenológicos y fluidodinámica computacional. VI CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA QUÍMICA, 2010.
- Reuge, N., Cadoret, L., Coufort-Saudejaud, C., Pannala, S., Syamlal, M. and B. Causat, Multifluid Eulerian Modeling of Dense Gas-Solids Fluidized Bed Hydrodynamics: Influence of the Dissipation Parameters, *Chemical Engineering Science*, 63: 5540-5551, 2008.
- Secretaría de Energía Argentina, *Energías Renovables- Diagnóstico, Barreras y Propuestas*, Argentina, 2009.
- Singh, R.I., Brink, A. and M. Hupa, CFD Modeling to Study Fluidized Bed Combustion and Gasification, *Applied Thermal Engineering*, 52: 585-614, 2013.
- Taghipour, F., Ellis, N. and C. Wong, Experimental and computational study of gas-solid Fluidized bed hydrodynamics, *Chemical Engineering Science*, 60: 6857-6867, 2005.
- Zhang, Y., Wenqi, Z. and B. Jin, Experimental and theoretical study on fluidization of stalk-shaped biomass particle in a fluidized bed, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 9, A54, 2011.