
**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL
COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**TESIS DE GRADO
INGENIERÍA QUÍMICA**

**FLUIDIZACIÓN DE MEZCLAS DE BIOMASA
FORESTAL Y ARENA. ESTUDIO
EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN POR CFD.**

Autor: Julio Sandoval

Legajo: 119654

**Directora: Dra. Mariana T. Zambon
Codirector: Dr. Andrés Reyes Urrutia**

Neuquén, 2019

RESUMEN

En la zona cordillerana de la región del Comahue, se generan grandes cantidades de residuos forestales con potencial para ser destinados a la generación de energía. Los métodos más eficientes de generación de energía a partir de biomasa emplean el proceso de gasificación en lecho fluidizado. Esta tecnología garantiza un valor potencialmente elevado de área superficial expuesta del combustible, lo que mejora el rendimiento. Además, la operación se efectúa a menor temperatura que en equipos convencionales, lo que minimiza la generación de dioxinas, NO_x , furanos y otros componentes volátiles.

Sin embargo, es importante considerar que la biomasa no fluidiza con facilidad debido a sus formas peculiares, tamaño y densidad. Para mejorar su fluidización es necesario incorporar un material inerte, como por ejemplo arena. Esto convierte al lecho en una mezcla binaria de sólidos, cuya fluidización difiere de la de un sólo componente que ya ha sido estudiada en profundidad por una gran cantidad de autores.

En este trabajo se estudia experimentalmente, por fluidodinámica computacional y, a través de ecuaciones predictivas, la fluidodinámica de mezclas biomasa-arena, con especial énfasis en la determinación de la velocidad de mínima fluidización. La evaluación de este parámetro operativo es una etapa previa e indispensable para el diseño del equipo de gasificación.

Los resultados obtenidos muestran que, con el agregado de arena en proporciones bajas, se logra una importante mejora en la calidad de la fluidización, frente a la operación con biomasa pura, junto con un bajo grado segregación.

Palabras clave — gasificación, lecho fluidizado, biomasa forestal, velocidad de mínima fluidización, ecuación predictiva, CFD.

ABSTRACT

In the mountain range, at the Comahue region, big amounts of forestry waste are generated with high potential for power generation. The most efficient processes of power generation from biomass, employ the gasification on fluidized bed units. This technology provides a huge exposed surface area of the fuel, which improves the process performance. Besides, the operation is done at a lower temperature than the usual values in conventional reactors, which minimize the dioxins, NO_x and other volatile compounds generation.

However, it is important to consider that biomass does not fluidize easily because of its particular shapes, sizes and densities. To improve its fluidization, it's necessary to incorporate an inert material like sand. This turns the bed into a binary mixture of solids, which fluidization differs from a single component, that has already been analyze more deeply by several authors.

This work includes three types of study of the mentioned binary system: experimental, through computational fluid dynamic and with predictive equations of the behavior of biomass-sand mixtures, with a special emphasis on the fluidization minimum velocity determination. The evaluation of this operative parameter is an indispensable preliminary stage for a gasification equipment design.

The results obtained show that with a small addition of sand to the biomass causes a significant improvement in the quality fluidization comparing with that of a pure biomass operation, along with a small grade of segregation.

Key words — gasification, fluidized bed, forestry waste, minimum fluidization velocity, predictive equation, CFD.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

| | |
|---|-----|
| 1.1 – Introducción | 1.3 |
| 1.2 - Objetivo general | 1.6 |
| 1.3 - Objetivos específicos..... | 1.6 |
| 1.4 – Descripción de los contenidos del trabajo | 1.7 |

CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN A LA FLUIDIZACIÓN Y LECHOS

FLUIDIZADOS

| | |
|---|------|
| 2.1 – Introducción | 2.3 |
| 2.2 – Sistemas fluidizados | 2.3 |
| 2.3 – Regímenes de fluidización..... | 2.5 |
| 2.4 - Clasificación de Geldart | 2.6 |
| 2.5 - Características fluidodinámicas de los lechos fluidizados por gas..... | 2.8 |
| 2.5.1 - Velocidades lineales y velocidades superficiales de gas y sólidos | 2.8 |
| 2.5.2 - Diagrama de pérdida de carga en función de la velocidad del gas | 2.9 |
| 2.5.3 – Determinación analítica de la velocidad de mínima fluidización | 2.12 |
| 2.5.4 - Determinación experimental de la velocidad de mínima fluidización | 2.14 |
| 2.5.5 – Lechos constituidos por partículas de diferentes tamaños | 2.14 |
| 2.5.6 – Altura del lecho | 2.15 |
| 2.6 - Ventajas y desventajas de aplicación de los lechos fluidizados | 2.16 |
| 2.7 - Aplicación al caso de estudio: obtención de energía a partir de biomasa | 2.17 |
| 2.7.1 – Gasificación y lechos fluidizados..... | 2.18 |

CAPÍTULO III: FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

| | |
|--|------|
| 3.1 - Introducción..... | 3.3 |
| 3.2 - Definición de la CFD..... | 3.3 |
| 3.2.1 - Aplicaciones de la CFD..... | 3.4 |
| 3.2.2 - Ventajas y desventajas..... | 3.5 |
| 3.3 - Como trabaja el software de CFD | 3.6 |
| 3.3.1 - Pre-procesamiento | 3.6 |
| 3.3.2 - Resolución..... | 3.8 |
| 3.3.2.1 - Ecuaciones fundamentales de fenómenos de transporte..... | 3.8 |
| 3.3.2.2 - Discretización en CFD..... | 3.9 |
| 3.3.2.3 - Pressure-based solver..... | 3.10 |
| 3.3.2.4 - Esquemas de interpolación..... | 3.11 |
| 3.3.2.5 - Factores de relajación..... | 3.11 |
| 3.3.2.6 - Condiciones de borde..... | 3.12 |
| 3.3.2.7 - Caracterización de las celdas..... | 3.13 |
| 3.3.2.8 - Criterios de convergencia..... | 3.13 |
| 3.3.3 - Post-procesamiento..... | 3.14 |
| 3.4 - Modelos y enfoques de ANSYS-Fluent 18.2 para simular lechos fluidizados..... | 3.15 |
| 3.4.1 - Simulación del lecho fijo: modelo de medio poroso..... | 3.15 |
| 3.4.1.1 - Limitaciones y limitaciones del modelo del medio poroso..... | 3.15 |
| 3.4.1.2 - Ecuaciones del modelo del medio poroso..... | 3.15 |
| 3.4.2 - Simulación del lecho fluidizado..... | 3.17 |
| 3.4.2.1 - Enfoque Euler-Lagrange..... | 3.17 |
| 3.4.2.2 - Enfoque Euler-Euler..... | 3.17 |
| 3.5 – Antecedentes de simulaciones por CFD | 3.18 |

CAPÍTULO IV: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FLUIDIZACIÓN DEL SISTEMA BINARIO ARENA-BIOMASA

| | |
|--|------|
| 4.1 - Introducción..... | 4.3 |
| 4.2 – Sección I: materiales, equipo experimental y metodología | 4.3 |
| 4.2.1 – Caracterización de las partículas..... | 4.3 |
| 4.2.2 – Materiales utilizados | 4.5 |
| 4.2.3 – Descripción del equipo experimental..... | 4.7 |
| 4.2.4 – Procedimiento experimental..... | 4.7 |
| 4.3 – Sección II: resultados experimentales..... | 4.9 |
| 4.3.1 – Lecho de partículas de arena | 4.9 |
| 4.3.2 – Lecho de partículas de biomasa | 4.10 |
| 4.3.3 – Mezclas binarias arena-biomasa | 4.13 |
| 4.3.4 – Comparación de las experiencias realizadas | 4.15 |

CAPÍTULO V: SIMULACIÓN POR CFD DE LECHOS FLUIDIZADOS DE SISTEMAS BINARIOS ARENA-BIOMASA

| | |
|---|------|
| 5.1 - Introducción..... | 5.3 |
| 5.2 – Geometría y mallado..... | 5.3 |
| 5.3 – Condiciones de contorno | 5.7 |
| 5.4 – Modelos de simulación | 5.9 |
| 5.4.1 – Modelo para la simulación de lecho fijo..... | 5.9 |
| 5.4.2 – Modelo para la simulación de lecho fluidizado | 5.12 |

CAPÍTULO VI: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES POR CFD Y COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

| | |
|---|------|
| 6.1 - Introducción..... | 6.3 |
| 6.2 – Simulación del lecho de partículas de arena | 6.3 |
| 6.3 – Simulación del lecho de partículas de biomasa | 6.6 |
| 6.4 – Simulaciones de fluidización de mezclas arena-biomasa | 6.8 |
| 6.4.1 – Simulación mezcla arena-biomasa. Sistema 15% V/V de arena | 6.9 |
| 6.4.2 – Simulación mezcla arena-biomasa. Sistema 30% V/V de arena | 6.11 |
| 6.4.3 – Simulación mezcla arena-biomasa. Sistema 40% V/V de arena | 6.13 |
| 6.5 – Comparación de los resultados | 6.14 |

CAPÍTULO VII: ECUACIONES PREDICTIVAS DE LA VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

| | |
|--|-----|
| 7.1 – Introducción | 7.3 |
| 7.2 – Ecuaciones predictivas de la U_{mf} obtenidas por Paudel y Feng..... | 7.3 |
| 7.2.1 – Correlación para la U_{mf} de partículas inertes | 7.3 |
| 7.2.2 – Correlación para la U_{mf} de partículas de biomasa..... | 7.4 |
| 7.2.3 – Correlación para la U_{mf} de mezclas binarias..... | 7.4 |
| 7.3 - Ecuación predictiva de la U_{mf} obtenida por Rowe y Nienow..... | 7.5 |
| 7.4 - Ecuaciones predictivas de la U_{mf} obtenidas por Chiba y col..... | 7.5 |
| 7.4.1 – Correlación para la U_{mf} de mezclas binarias completamente segregadas..... | 7.5 |
| 7.4.2 – Correlación para la U_{mf} de mezclas binarias completamente mezcladas..... | 7.6 |
| 7.5 - Ecuaciones predictivas de la U_{mf} obtenidas por Noda y col..... | 7.6 |
| 7.5.1 – Correlación para B en mezclas binarias completamente mezcladas | 7.7 |
| 7.5.2 – Correlación para B en mezclas binarias parcialmente mezcladas..... | 7.8 |
| 7.6 - Ecuación predictiva de la U_{mf} visual de mezclas binarias obtenida por Bilbao y col..... | 7.8 |
| 7.7 - Ecuación predictiva de la U_{mf} obtenida por Oliveira y col..... | 7.9 |
| 7.8 – Aplicación al caso en estudio de las correlaciones para U_{mf} | 7.9 |

CAPÍTULO VIII: RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

| | |
|----------------------------------|-----|
| 8.1 - Introducción | 8.3 |
| 8.2 – Resumen de resultados..... | 8.3 |
| 8.3 - Conclusiones..... | 8.4 |
| | |
| Nomenclatura..... | N.1 |
| Referencias bibliográficas..... | B.1 |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

| | |
|---|-----|
| 1.1 – Introducción | 1.3 |
| 1.2 - Objetivo general | 1.6 |
| 1.3 - Objetivos específicos..... | 1.6 |
| 1.4 – Descripción de los contenidos del trabajo | 1.7 |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 – INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles, en especial los derivados del petróleo y, posteriormente, el gas natural, se fueron convirtiendo desde fines del siglo XIX y durante el siglo XX en la principal fuente de energía primaria del ser humano. Uno de sus rasgos fundamentales es que no son renovables, es decir que se dispone de una cantidad finita y por lo tanto es imprescindible prever su agotamiento. Ante esto es necesario disponer de fuentes de energía primaria, renovables, que avancen en su sustitución. La biomasa es una de ellas.

En primer lugar, se debe definir el concepto de biomasa: en su acepción más general es el conjunto de toda la materia orgánica del reino vegetal y animal. Pero el significado particular del término biomasa, dentro del campo de su utilización como fuente de energía, hace referencia a cultivos energéticos (o sea cultivos con el único fin de obtener energía) y residuos orgánicos (agroindustriales, agrícolas, forestales, urbanos, etc.) ([Energía renovable - Energía biomasa, Secretaría de Energía Argentina, 2008](#)). Dentro del uso de la biomasa como fuente energética surgen distintas clasificaciones arbitrarias, siendo una de ellas la distinción entre biomasa húmeda (ej. excremento animal, caña de azúcar, etc.) y biomasa seca (ej. residuos de leña, paja, etc.). Los procesos para obtener energía a partir de la biomasa húmeda son mayormente procesos físicos o bioquímicos, y para la biomasa seca son procesos termoquímicos, que se basan en la aplicación de calor para generar reacciones químicas que conducirán a la transformación de la biomasa inicial. De esta manera se pueden obtener compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que servirán como materias primas para generar derivados útiles para la industria, síntesis de productos químicos y generación de energía.

En la zona cordillerana de la región del Comahue, se generan grandes cantidades de residuos forestales (aserrín, ramas, residuos de podas, etc.) con potencial para ser destinados a la generación de energía. La utilización de esta biomasa forestal (biomasa

tipo seca) como fuente alternativa de energía también aportaría una conveniente solución al problema del manejo y disposición de estos voluminosos residuos.

Los sistemas más avanzados y eficientes de generación de energía a partir de biomasa seca emplean el proceso de gasificación en reactores de lecho fluidizado burbujeante. Esta tecnología garantiza una gran área superficial expuesta de combustible, que da lugar a un mayor rendimiento y un menor nivel de temperatura de operación lo que minimiza la generación de dioxinas, óxidos de nitrógeno (NO_x) entre otros (Basu, 2010).

Sin embargo, la biomasa no fluidiza con facilidad debido a sus formas irregulares, tamaño y densidad. Para mejorar su fluidización es necesario incorporar un material inerte como por ejemplo arena, perlas de vidrio o alúmina (Clarke y col., 2005).

Cuando se fluidiza biomasa junto con arena en un equipo de gasificación, son dos las mejoras que se observan. La primera está relacionada con la fluidización, ya que se logra mayor agitación y formación de burbujas, a una menor velocidad del gas; la segunda mejora se relaciona con un incremento de la transferencia de calor y, en consecuencia, un aumento en el rendimiento de la gasificación, debida a la incorporación de un sólido con alta capacidad calorífica como la arena (Proenza Pérez y col., 2017).

La velocidad de mínima fluidización (U_{mf}) es, sin lugar a duda, uno de los parámetros más importantes de un proceso de fluidización. Su determinación es primordial para llevar a cabo un diseño y operación adecuados del equipo de lecho fluidizado (Kunii y Levenspiel, 1991).

En los últimos quince años, se han dedicado considerables esfuerzos a investigar las características fluidodinámicas de las mezclas binarias biomasa-inerte. Clarke y col. (2005) investigaron la fluidización de mezclas binarias de aserrín con distintos contenidos de humedad y perlas de vidrio como material inerte. Observaron que a medida que se incrementa el contenido de humedad del aserrín, la velocidad de mínima fluidización de la mezcla también se incrementa. Los autores informaron la existencia de un límite superior de humedad al cual puede lograrse la fluidización. Cuando la humedad alcanza los valores de 33% y 54% en base seca, comienzan a presentarse los fenómenos de

segregación y canalización en las mezclas con partículas de vidrio de 0,322 y 0,516 mm de diámetro, respectivamente.

Rao y Bheemarasetti (2001) estudiaron experimentalmente la fluidización de mezclas de distintos tipos de biomasa y arena. Propusieron una nueva correlación para calcular U_{mf} de mezclas arena-biomasa basada en una densidad y un diámetro efectivos de la mezcla. Esta ecuación predice adecuadamente los valores experimentales para fracciones de hasta el 10% en peso de biomasa.

Un estudio similar fue llevado a cabo por Paudel y Feng (2013) utilizando maíz y cáscara de nuez como biomasa, junto con arena, vidrio y alúmina como materiales inertes, con porcentajes en peso de biomasa cubriendo el rango de 0 a 100%. En el trabajo se propone una correlación para evaluar la U_{mf} que tiene en cuenta el porcentaje másico de biomasa y el número de Arquímedes. Los resultados que predice muestran una buena concordancia con los datos experimentales para la biomasa estudiada.

Zhang y col. (2011) realizaron un detallado estudio experimental de la fluidización de mezclas de biomasa peletizada y arena en tres tamaños diferentes. Encontraron que el agregado de inerte favorece la fluidización de la biomasa, lográndose disminuir marcadamente la U_{mf} . Adicionalmente estudiaron la transición de régimen burbujeante a turbulento y propusieron una ecuación para predecir la velocidad de transición de un régimen a otro.

Sin embargo, a pesar de los aportes mencionados, la caracterización fluidodinámica de las mezclas binarias no es totalmente satisfactoria. Por esta razón, en este trabajo se propone aplicar la técnica de fluidodinámica computacional (CFD) para simular la fluidización de mezclas arena-biomasa. La CFD proporciona hoy un nuevo enfoque para comprender la hidrodinámica y los mecanismos de transferencia predominantes en los sistemas con flujos multifásicos.

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. En consecuencia, la fluidización de una mezcla sólida como la mencionada se diferencia marcadamente de la de un sólo

componente, que sí ha sido estudiada en considerable profundidad mediante la aplicación de métodos numéricos (Taghipour y col., 2005; Cornelissen y col., 2007; Reuge y col., 2008; Hosseini y col., 2010).

Para validar los resultados de las simulaciones, se efectuarán mediciones en un lecho experimental a escala de laboratorio, para distintas proporciones de biomasa y arena. Este estudio constituye una etapa previa e indispensable para lograr la simulación completa, con presencia de reacción química, de un reactor de gasificación de lecho fluidizado.

1.2 - OBJETIVO GENERAL:

El objetivo general de este trabajo comprende el estudio del comportamiento fluidodinámico de los sistemas arena-biomasa fluidizados con aire, a fin de lograr un conocimiento exhaustivo de su comportamiento, para su posterior aplicación a la simulación y análisis de los procesos de gasificación de biomasa en reactores de lecho fluidizado.

1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Caracterizar las partículas sólidas (determinación de diámetro medio y densidad).
- Estudiar experimentalmente el comportamiento fluidodinámico de la mezcla arena-biomasa evaluando la pérdida de carga y la velocidad de mínima fluidización.
- Desarrollar una metodología para la simulación de mezclas binarias en lecho fluidizado, con soporte del software ANSYS-Fluent 18.2, analizando las distintas alternativas disponibles para llevar a cabo la simulación.
- Validar el modelo seleccionado contrastando los resultados de las simulaciones con los datos experimentales obtenidos.

- Realizar una comparación de los resultados experimentales, con valores de velocidad de mínima fluidización obtenidos a partir de ecuaciones predictivas halladas en la bibliografía para sistemas binarios.

1.4 - DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS DEL TRABAJO

A fin de presentar una guía del trabajo, a continuación, se describen los contenidos que se desarrollarán en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO II: Con el fin de reunir los elementos necesarios para la descripción de las condiciones de operación del lecho, se presenta en este capítulo una descripción de los sistemas fluidizados, los diferentes regímenes en los cuales se puede encontrar el lecho, definiciones de los parámetros fluidodinámicos característicos y una breve reseña de la aplicación industrial al caso en estudio.

CAPÍTULO III: Este capítulo presenta una descripción general de la CFD, las ventajas y desventajas de su utilización y una breve introducción sobre las etapas necesarias para llevar a cabo un análisis por CFD. Además, se explican los distintos modelos de resolución con los que cuenta el software ANSYS-Fluent 18.2 y finalmente se presentan algunos antecedentes de simulaciones por CFD.

CAPÍTULO IV: Este capítulo se divide en dos secciones. La primera está destinada a la descripción de la operación del equipo experimental y los materiales utilizados. Se presenta también la metodología empleada para la medición de los parámetros fluidodinámicos de interés. En la segunda sección, se muestran los resultados obtenidos durante la experiencia y la determinación de la velocidad de mínima fluidización.

CAPÍTULO V: Este capítulo está destinado al desarrollo de la metodología llevada a cabo para realizar las simulaciones, incluyendo el proceso de validación de las mallas. Concluye con la justificación de la elección de los modelos utilizados, e incluye una descripción del procedimiento empleado para calcular la pérdida de carga a través del lecho, a partir de dichas simulaciones.

CAPÍTULO VI: En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones. Los mismos son comparados con los valores de los parámetros calculados experimentalmente.

CAPÍTULO VII: Aquí se presentan las correlaciones que diferentes autores han desarrollado para predecir la velocidad de mínima fluidización, y luego, se las aplica al caso en estudio con el fin de comparar las predicciones con los resultados obtenidos en el [Capítulo IV](#).

CAPÍTULO VIII: Se resumen los resultados obtenidos con los diferentes métodos utilizados para el estudio de los sistemas fluidizados y, finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas del análisis de los mismos.

CAPÍTULO II

INTRODUCCIÓN A LA FLUIDIZACIÓN Y LECHOS FLUIDIZADOS

| | |
|---|------|
| 2.1 – Introducción | 2.3 |
| 2.2 – Sistemas fluidizados | 2.3 |
| 2.3 – Regímenes de fluidización..... | 2.5 |
| 2.4 - Clasificación de Geldart | 2.6 |
| 2.5 - Características fluidodinámicas de los lechos fluidizados por gas..... | 2.8 |
| 2.5.1 - Velocidades lineales y velocidades superficiales de gas y sólidos..... | 2.8 |
| 2.5.2 - Diagrama de pérdida de carga en función de la velocidad del gas..... | 2.9 |
| 2.5.3 – Determinación analítica de la velocidad de mínima fluidización | 2.12 |
| 2.5.4 - Determinación experimental de la velocidad de mínima fluidización ... | 2.14 |
| 2.5.5 – Lechos constituidos por partículas de diferentes tamaños | 2.14 |
| 2.5.6 – Altura del lecho | 2.15 |
| 2.6 - Ventajas y desventajas de aplicación de los lechos fluidizados | 2.16 |
| 2.7 - Aplicación al caso de estudio: obtención de energía a partir de biomasa | 2.17 |
| 2.7.1 – Gasificación y lechos fluidizados..... | 2.18 |

CAPÍTULO II

INTRODUCCIÓN A LA FLUIDIZACIÓN Y LECHOS FLUIDIZADOS

2.1 – INTRODUCCIÓN

Los sistemas fluidizados se originan como una técnica en procesos de gasificación de lignita propuestos por Winkler alrededor de 1926, aunque cobran una magnitud significativa cuando se los asocia con el craqueo catalítico de gasoil para obtener gasolinas de aviación de alto octanaje (implementado por la *Baton Rouge Refinery of Standard Oil of New Jersey* -actual *Exxon*- en 1942). Antes de ello, el cracking catalítico se llevaba a cabo en reactores de lecho fijo. Dado que el proceso de cracking produce la deposición de carbón sobre el catalizador produciendo su desactivación, era necesario detener la producción para poder regenerarlo, lo que implicaba un costo demasiado alto por tener que interrumpir el funcionamiento del reactor. [Froment y Bischoff \(1990\)](#), presentaron una síntesis donde se intentaba eliminar esta regeneración externa, tratando de implementar un proceso continuo fluidizado.

2.2 – SISTEMAS FLUIDIZADOS

Cuando se utiliza un flujo constante, con dirección ascendente, de un fluido (líquido o gas) a una velocidad apropiada para atravesar un conjunto de partículas sólidas que conforman un lecho en reposo, es posible separar las partículas del mismo y que adquieran movilidad, generando el inicio del estado de fluidez en el conjunto fluido-sólido. Cuando la velocidad del fluido es baja, los espacios interparticulares ofrecen la suficiente resistencia para provocar una caída de presión que aumentará conforme la velocidad superficial del fluido se incremente, debido a la fricción. No obstante, en un cierto instante, alcanzará la condición en la cual la resistencia por rozamiento sobre las partículas iguale a su peso aparente (valor obtenido restando el empuje al peso real). En la [Figura 2.1](#) se puede ver el conjunto de fuerzas que actúan sobre una partícula. En este estado, llamado de mínima fluidización, las partículas sufren un reordenamiento con el fin de ofrecer una resistencia menor al desplazamiento del gas, son tangencialmente

puestas en movimiento por el fluido, la separación entre partículas aumenta y estarán “flotando hidrodinámicamente” o en *estado fluidizado*. Comenzará así una expansión del lecho. Este proceso continúa al ir aumentando la velocidad, permaneciendo la fuerza debida a la fricción igual al peso aparente de las partículas, hasta que el lecho ha adquirido la forma más abierta de relleno.

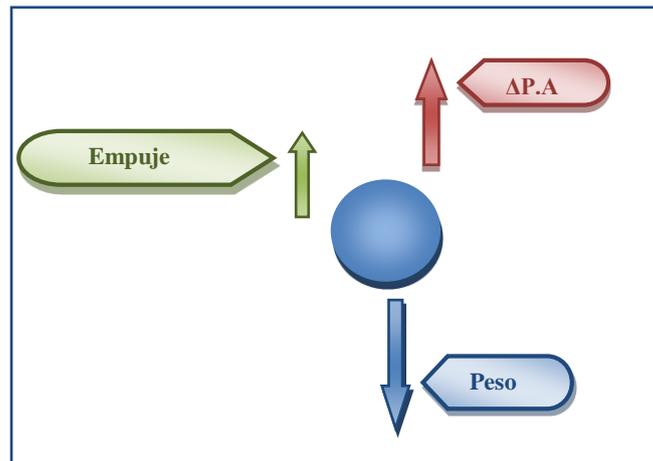


Figura 2.1 - Balance de fuerzas sobre una partícula en el estado de mínima fluidización.

Los lechos fluidizados presentan un comportamiento similar al de un líquido, cumpliendo con las propiedades que se esquematizan en la Figura 2.2.

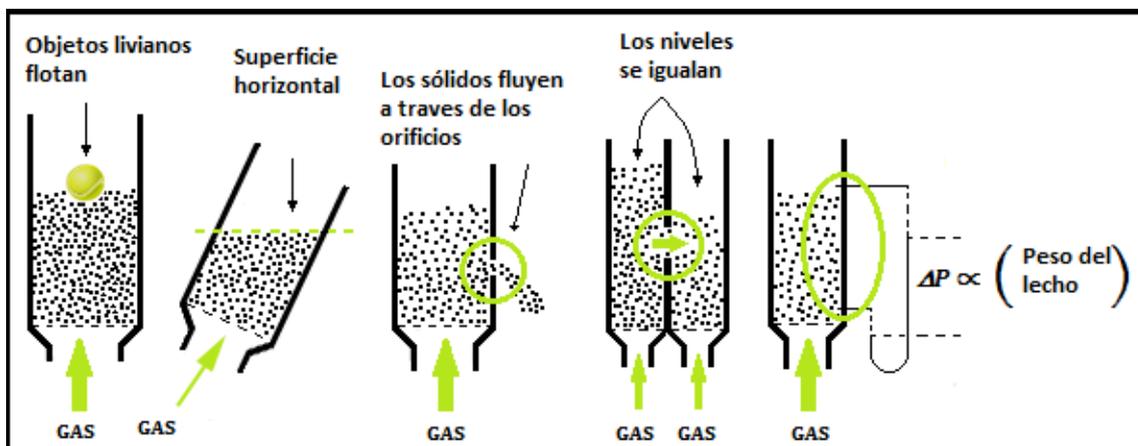


Figura 2.2 - Similitud de comportamiento entre un lecho fluidizado y un líquido.

Las principales características de comportamiento son:

- Los objetos livianos flotarán sobre la superficie.
- El lecho mantiene la horizontalidad de la superficie aun si se inclina el recipiente.
- Los sólidos saldrán como un chorro que brota de perforaciones en el recipiente.

- Dos recipientes que contienen lechos fluidizados y se conectan, por el principio de vasos comunicantes tenderán a igualar el nivel del “fluido”.
- La caída de presión entre dos puntos que signifiquen dos alturas del lecho es aproximadamente igual a la presión hidrostática entre ambos puntos.

2.3 - REGÍMENES DE FLUIDIZACIÓN

Los regímenes de fluidización pueden ser clasificados en dos grandes categorías: *uniforme* (suave) y *agregativa* o burbujeante (Harrison y Leung, 1961). La mayoría de los lechos fluidizados por líquidos bajo condiciones normales de operación presentan fluidización particulada. En la fluidización particulada, las partículas sólidas se dispersan uniformemente en el medio fluidizante con burbujas difícilmente identificables. Por este motivo la fluidización particulada también es conocida como fluidización *homogénea*. En la fluidización *heterogénea* o agregativa, espacios que no contienen sólidos son usualmente observados. Estos espacios vacíos son llamados “burbujas”, y pueden ser bien definidos en lechos con fluidización burbujeante o *slugging*, pero son muy difíciles de definir en los lechos turbulentos o en lechos que presentan fluidización rápida.

A partir de la condición de lecho fijo, incrementando la velocidad superficial del fluido y luego de alcanzar la mínima fluidización, se pueden observar diferentes regímenes que son muy diferentes, como se aprecia en la Figura 2.3.

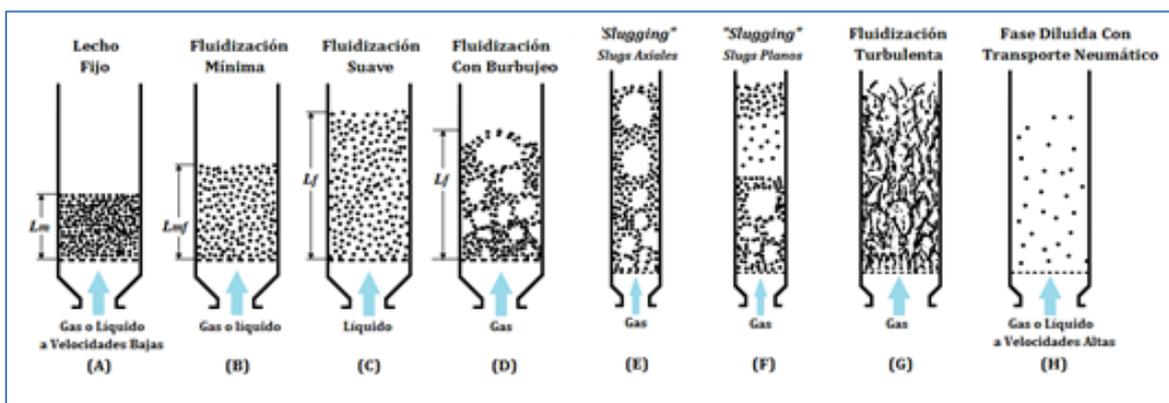


Figura 2.3 - Regímenes de fluidización en función del incremento de la velocidad superficial del fluido.

(Kunii y Levenspiel, 1991)

Para los sistemas gas-sólido, hay al menos cuatro regímenes cautivos de fluidización observables experimentalmente:

- Lecho fijo (previo al régimen de lecho fluidizado).
- Fluidización particulada.
- Fluidización burbujeante.
- Fluidización en flujo tapón (*Slugging*).
- Fluidización turbulenta.

La existencia de estos diferentes regímenes de funcionamiento o comportamiento hacen que la aplicación de los lechos fluidizados sea de amplio rango, al ser sus características diferentes y determinantes según las necesidades a las que esté destinado el lecho, o el régimen en el que se encuentre operando.

2.4 - CLASIFICACIÓN DE GELDART

La capacidad y el modo en que las diferentes partículas fluidizan, varía según su naturaleza. Geldart (1973) estudió la fluidización de una gran cantidad de sólidos de diferentes tipos y tamaños, en condiciones ambiente, y reconoció que existían cuatro clases de partículas bien definidas, con características específicas. La transición de un grupo a otro no es directa sino progresiva, lo cual significa que los grupos adjuntos en sus regiones de separación crean subgrupos con propiedades de los grupos adyacentes.

En la Figura 2.4, se presenta la clasificación hallada. Ordenadas de menor a mayor tamaño, las clases de Geldart (1973) son:

- **Grupo C:** Son partículas con altas dificultades para fluidizar, debido a su pequeño diámetro (menor a 30 μ) que provoca que las fuerzas cohesivas entre ellas sean importantes y formen aglomerados. Como ejemplo podemos citar las harinas, almidón, talco o azúcar impalpable.
- **Grupo A:** Son partículas de pequeño tamaño y fácil fluidización, diámetros entre 30 μ y 100 μ , y baja densidad ($\rho_p < 1400 \text{ Kg m}^{-3}$). La expansión que aparece en los lechos compuestos por este tipo de partículas es alta antes de aparecer el régimen burbujeante, necesitando velocidades mínimas de estado burbujeante mayores al resto. La velocidad de mínimo burbujeo es mayor que la de mínima

fluidización. Los catalizadores de craqueo catalítico constituyen un ejemplo de ellas.

- **Grupo B:** Son partículas de diámetro entre 40 y 500 μm y con densidades entre 1400 y 4000 Kg m^{-3} . Estos sólidos fluidizan bien, forman burbujas vigorosas que crecen hasta tamaños importantes. Las burbujas aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización. Son preferentemente usados en equipos piloto y de laboratorio. Un ejemplo típico son los granos de arena, por lo cual estas partículas también son conocidas como arenosas.
- **Grupo D:** Son partículas de diámetro superior a las 500 μm y/o densas, de las cuales existe menos información publicada. Tienen un comportamiento errático. Con este tipo de sólidos se obtienen lechos de chorro estables (*spouted beds*). En general el gas se canaliza, y se requieren grandes caudales de aire para lograr la fluidización. Ejemplos: granos de café, carbón a gasificar, partículas de urea granulada.

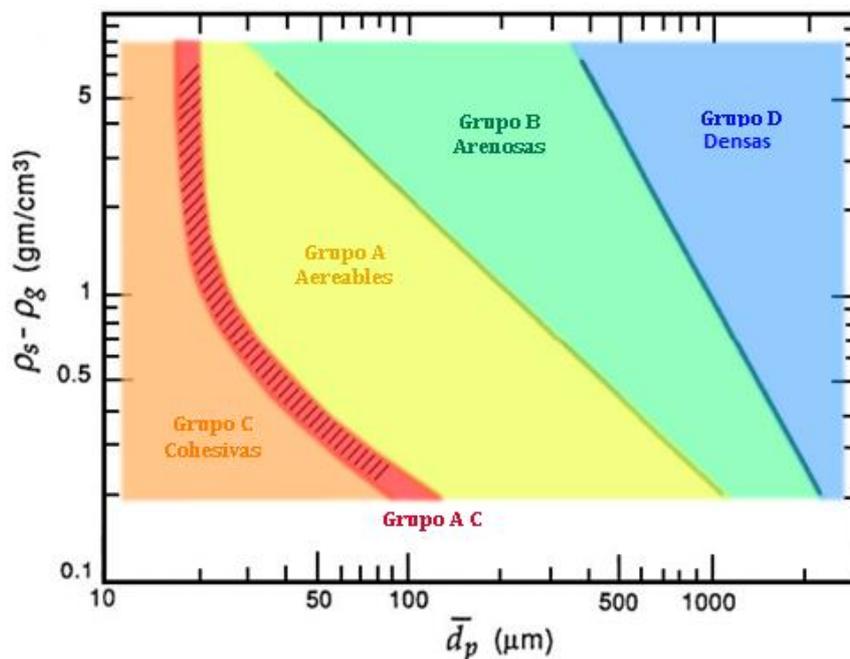


Figura 2.4 - Clasificación de partículas propuesta por Geldart (1973). En el eje de las ordenadas esta la diferencia entre las densidades de las partículas sólidas y la densidad del agente fluidizante, y en el de las abscisas está el diámetro medio de las partículas.

En la Figura 2.5, se encuentra una comparación de tamaños de los diferentes tipos de partículas.



Figura 2.5 - Tipo de partículas de acuerdo a la clasificación de Geldart (1973).

2.5 - CARACTERÍSTICAS FLUIDODINÁMICAS DE LOS LECHOS FLUIDIZADOS POR GAS

Los lechos de partículas sólidas en los cuales las fuerzas originadas por el arrastre de una corriente ascendente de gas equiparan el peso de las mismas, se denominan lechos fluidizados por gas.

2.5.1 – VELOCIDADES LINEALES Y VELOCIDADES SUPERFICIALES DE GAS Y SÓLIDOS

Para el estudio del comportamiento de los lechos fluidizados es necesario adoptar definiciones precisas de las velocidades de gas y partículas y de la velocidad relativa entre ambos, conocida en inglés como *slip velocity*. Los términos suelen ser utilizados erróneamente en la bibliografía, por lo que nos referiremos brevemente a las definiciones correctas.

La velocidad superficial del gas se define como el cociente entre el flujo volumétrico de gas y la sección transversal del tubo o recipiente que contiene al medio fluidizado.

$$U_s = \frac{Q_g}{A} \quad (2.1)$$

Análogamente, la velocidad superficial de los sólidos se define como el cociente entre el flujo volumétrico de partículas y el área transversal del recipiente:

$$U_p = \frac{Q_p}{A} \quad (2.2)$$

La fracción de la superficie transversal de recipiente o tubo disponible para el flujo de gas, se supone usualmente igual a la fracción volumétrica de gas, es decir a la porosidad o fracción de huecos (ε). La fracción de área transversal disponible para el flujo de sólidos es, en consecuencia $(1 - \varepsilon)$. En este contexto, las velocidades reales (lineales) de la fase gaseosa y del sólido, u y u_p se expresan mediante las relaciones siguientes:

$$u = \frac{Q_g}{A \varepsilon} \quad (2.3)$$

$$u_p = \frac{Q_p}{A(1 - \varepsilon)} \quad (2.4)$$

Las velocidades reales y superficiales se vinculan mediante las relaciones (2.5) que se incluyen a continuación:

$$u = \frac{U_s}{\varepsilon} \quad (2.5a)$$

$$u_p = \frac{U_p}{(1 - \varepsilon)} \quad (2.5b)$$

La velocidad relativa entre las fases u_{rel} se define como la diferencia expresada en la ecuación (2.6) y es usual referirse a ella, como se mencionó previamente, como *slip velocity*, u_{slip} .

$$u_{rel} = u_{slip} = u - u_p \quad (2.6)$$

2.5.2 - DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE CARGA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL GAS

El fenómeno de fluidización puede ser caracterizado mediante un gráfico de la pérdida de carga a través del lecho frente a la velocidad superficial del fluido en la sección de entrada. En la [Figura 2.6](#) se representa el comportamiento de un lecho de partículas Geldart B.

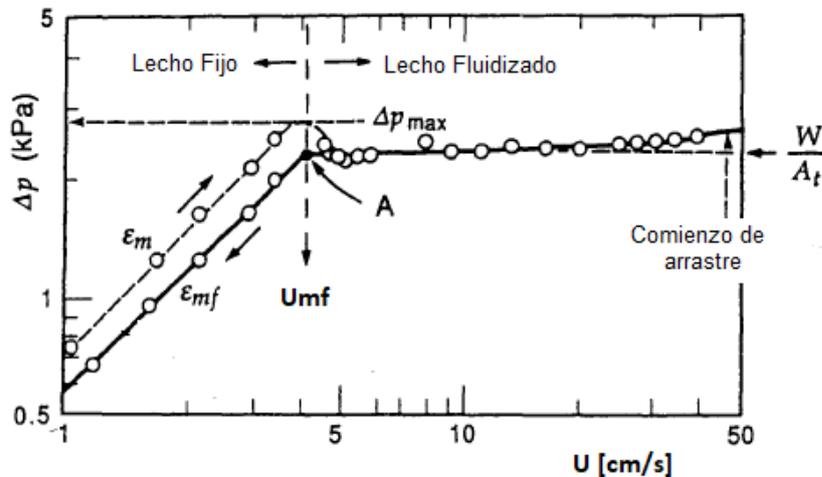


Figura 2.6 – Pérdida de carga a través del lecho vs. velocidad superficial del gas. Adaptado de Kunii y Levenspiel (1991).

La velocidad superficial mínima de gas que se requiere para alcanzar la condición de fluidización, se conoce como velocidad de mínima fluidización (U_{mf}). Cuando la velocidad superficial del gas U_s , es menor que U_{mf} , el lecho se comporta como un lecho fijo.

En la Figura 2.6 puede observarse que al aumentar la velocidad U_s (línea de trazos), la caída de presión o pérdida de carga (ΔP) pasa por un máximo, disminuye ligeramente luego y, finalmente, adopta un valor aproximadamente constante, independiente de la velocidad del gas.

El valor de ΔP graficado corresponde a la diferencia de presión entre una posición en la sección superior, definida por la altura del lecho en reposo, y otra, ubicada inmediatamente sobre la placa distribuidora de gas. ΔP no incluye la pérdida de carga en el distribuidor.

En la región de lecho fijo, en la cual ΔP aumenta con el incremento de U_s , la pérdida de carga se puede estimar mediante la ecuación (2.7) propuesta por Ergun (1952).

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150(1 - \varepsilon)^2 \mu_g}{\varepsilon^3 d_p^2} U_s + \frac{1,75(1 - \varepsilon) \rho_g}{\varepsilon^3 d_p} U_s^2 \quad (2.7)$$

En la región de lecho fluidizado, la pérdida de carga se estabiliza en el valor correspondiente al peso del lecho dividido el área de sección transversal del lecho

(W/A). En la práctica, sin embargo, la caída de presión puede ser menor que W/A debido a que, especialmente en tubos de pequeño diámetro, parte del lecho es sostenido por las paredes debido a la fricción y por el distribuidor, y también, debido a la canalización que se manifiesta en algunos sistemas (Dhodapkar y col., 2012).

La pérdida de carga en esta región se puede estimar, realizando un balance de fuerzas en la condición de mínima fluidización. Ignorando las que se ejercen sobre la pared del recipiente, se tiene que:

$$\left(\begin{array}{l} \text{fuerza de arrastre} \\ \text{ejercida por el gas} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{peso de} \\ \text{las partículas} \end{array} \right) \quad (2.8a)$$

Que se puede escribir del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{l} \text{pérdida de carga} \\ \text{a través del lecho} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Área transversal} \\ \text{del lecho} \end{array} \right) \\ = \left(\begin{array}{l} \text{Volumen} \\ \text{del lecho} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Fracción} \\ \text{de sólidos} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{peso específico} \\ \text{de sólidos} \end{array} \right) \end{aligned} \quad (2.8b)$$

Escribiendo la ecuación anterior para la condición de mínima fluidización y con ΔP positivo:

$$\Delta P A = W = A H_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \quad (2.8c)$$

Que se puede escribir como:

$$\frac{-\Delta P}{H_{mf}} = g (\rho_p - \rho_g) (1 - \varepsilon_{mf}) \quad (2.9)$$

Donde ε_{mf} y H_{mf} son la porosidad y la altura del lecho en condiciones de mínima fluidización, ρ_g y ρ_p las densidades del gas y el sólido respectivamente y A el área de sección transversal del lecho.

Finalmente, un incremento de U_s por encima de la velocidad terminal, U_t , conducirá a la condición de transporte neumático, con la gradual disminución de ΔP conforme aumenta U_s , debido a que la cantidad de partículas en el lecho comienza a disminuir.

Si se realiza el proceso inverso, disminuyendo la U_s , el sistema recorrerá los estados señalados por la línea llena, debido a que, en la condición de fluidización

incipiente, las partículas se acomodan con una porosidad mayor a la inicial, presentando menor resistencia al paso del gas por el lecho (Kunii y Levenspiel, 1991).

En los lechos fluidizados por gas, al aumentar la velocidad superficial del mismo, éste debe expandirse para reducir la fricción ejercida por las partículas, produciéndose la formación de bolsones de gas, que prácticamente carecen de partículas en su interior y ascienden a través del lecho con una velocidad determinada por el balance de fuerzas de inercia y de flotación ejercidas por el resto del lecho. De tal forma, el lecho se compone, prácticamente, de dos fases: la denominada *fase densa* o *emulsión*, que se encuentra en condiciones de mínima fluidización, y una segunda fase, discontinua en sí, formada por los bolsones de gas, que se conoce como *fase burbuja*, por su semejanza con las burbujas gaseosas formadas en una masa de líquido (Kunii y Levenspiel, 1991).

2.5.3 - DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE LA VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

Experimentalmente, se ha comprobado que la velocidad de mínima fluidización es dependiente del tamaño y la densidad de las partículas del lecho, de las propiedades del gas fluidizante y de las condiciones de presión y temperatura en las que se lleva a cabo el proceso.

La velocidad de mínima fluidización define el paso del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado. De este modo, es posible obtener una expresión para su cálculo igualando la expresión de pérdida de carga en el lecho fijo (2.7), particularizada para las condiciones de mínima fluidización, con la expresión de pérdida de carga en el lecho fluidizado (2.9). Así, se obtiene:

$$g(\rho_p - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf}) = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})^2 \mu_g}{\varepsilon_{mf}^3 d_p^2} U_{mf} + \frac{1,75(1 - \varepsilon_{mf})\rho_g}{\varepsilon_{mf}^3 d_p} U_{mf}^2 \quad (2.10)$$

La ecuación (2.10) permite determinar la velocidad de mínima fluidización, conocidas las propiedades de las partículas y del fluido, además de la porosidad del lecho. Esta expresión se puede escribir en función del número adimensional de

Reynolds que evalúa el movimiento entre el fluido y la partícula en función de la velocidad de éste, y el número adimensional de Arquímedes que valora la interacción entre fluido y partícula en función de la diferencia de sus densidades.

De esta forma, multiplicando y dividiendo (2.10) por $\left(\frac{\mu_g}{\rho_g d_p^3}\right)$ se tiene:

$$\begin{aligned} g(\rho_p - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf}) \\ = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3} \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu_g} \\ + \frac{1,75(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g^2}{\rho_g d_p^3} \left(\frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu_g}\right)^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Que se puede escribir del siguiente modo:

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} + 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 \quad (2.12)$$

Donde Re_{mf} es el número de Reynolds en condiciones de mínima fluidización y Ar el número de Arquímedes:

$$Re_{mf} = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu_g} \quad (2.13a) \quad Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) d_p^3 g}{\mu_g^2} \quad (2.13b)$$

Si bien la ecuación (2.12) puede ser utilizada para evaluar la velocidad de mínima fluidización, en la práctica resulta conveniente contar con expresiones que no dependan de la porosidad de mínima fluidización, parámetro que resulta complejo de determinar con exactitud y que en principio puede variar entre 0,4 y 0,5.

Algunos autores han incorporado en sus correlaciones el efecto de dicha porosidad, no requiriéndola explícitamente para evaluar U_{mf} . Wen y Yu (1966) basados en datos experimentales, observaron que las siguientes relaciones se mantenían prácticamente constantes para varios tipos de partículas.

$$\frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \cong 11$$

Con lo cual la ecuación (2.12) se reduce a:

$$Ar = 1650Re_{mf} + 24,5Re_{mf}^2 \quad (2.14)$$

Baeyens y Geldart (1974), propusieron la siguiente expresión:

$$Ar = 1823Re_{mf}^{1,07} + 21,7Re_{mf}^2 \quad (2.15)$$

Que puede aproximarse, teniendo en cuenta que el número de Arquímedes es conocido, mediante la siguiente expresión que permite el cálculo directo de Re_{mf} .

$$Re_{mf} = -57,09[1920 + 0,0564Ar^{1/1,07}]^{0,535} \quad (2.16)$$

2.5.4 – DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

La U_{mf} se estima a partir del gráfico ΔP Vs. U_s construido experimentalmente, como el de la Figura 2.6, realizando una extrapolación lineal de los puntos obtenidos en ambas regiones, lecho en reposo y fluidizado, y localizando el punto de intersección de ambas rectas. Para evaluar la U_{mf} , se recomienda utilizar la curva de desfluidización (Dhodapkar y col., 2012; Kunii y Levenspiel, 1991).

2.5.5 - LECHOS CONSTITUIDOS POR PARTÍCULAS DE DIFERENTES TAMAÑOS

Cuando se fluidiza un lecho en el que existen partículas de tamaños diferentes, a medida que se incrementa la velocidad del gas, las partículas más pequeñas pueden ubicarse en los intersticios existentes entre partículas grandes y adquirir un estado fluidizado cuando aún las partículas grandes permanecen en reposo, constituyendo pequeñas celdas locales de sólido fluidizado contenido por “paredes” conformadas por las partículas de mayor tamaño. En esta situación, tiene lugar una fluidización parcial del lecho, que provoca una caída de presión intermedia. Posteriores incrementos de U_s determinarán que el ΔP se aproxime al valor W/A , lo que indicará que todo el lecho está fluidizado. La Figura 2.7, típica de estos sistemas con

distribución de tamaños amplia, permite visualizar esta fluidización progresiva del lecho. Para mezclas que contienen partículas grandes ($d_p > 1$ mm), puede ocurrir la segregación y el asentamiento de esas partículas grandes, dando un incremento escalonado en el ΔP y la histéresis de la curva del ΔP frente a U_s . Sin embargo, esa histéresis desaparece cuando el lecho contiene una gran fracción de finos.

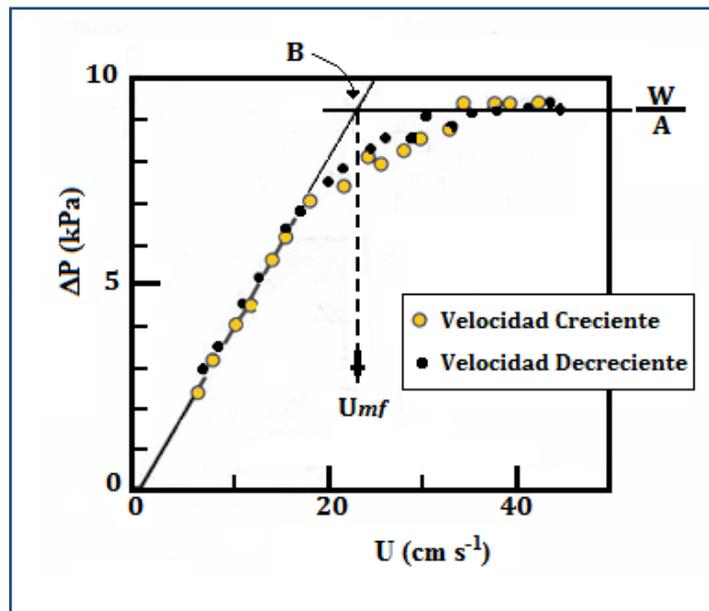


Figura 2.7 – Pérdida de carga en función de la velocidad de fluidización, para partículas con amplia distribución de tamaños. Adaptada de Kunii y Levenspiel (1991).

2.5.6 - ALTURA DE LECHO

Diferenciando los estados de lecho fijo y fluidizado resulta relevante describir la altura del lecho como variable fundamental. Mientras el régimen corresponde al lecho fijo, la altura del mismo permanece constante ante aumentos progresivos de la velocidad superficial del gas, debido a que la distancia inter-particular permanece invariable y las partículas aun no poseen movilidad.

Cuando el fluido alcanza la condición de mínima fluidización se produce la expansión del lecho, con el aumento de su altura que corresponderá al valor de la altura de mínima fluidización H_{mf} .

2.6 - VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DE LOS LECHOS FLUIDIZADOS

Los lechos fluidizados muestran ciertas características deseables e indeseables durante su operación. Entre los aspectos beneficiosos de estos sistemas se destacan los siguientes:

- El comportamiento análogo al de un fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite desarrollar las operaciones con facilidad.
- La rapidez con que se mezclan las partículas, facilita la obtención de valores de temperatura constantes en todo el lecho, lo que confiere sencillez y seguridad al control de la operación.
- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible remover (o suministrar) grandes cantidades de calor que se puedan producir (o necesitar) en reactores de gran tamaño.
- Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas son mayores que en otros sistemas de contacto.
- La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en él es alta, por lo que los intercambiadores de calor dentro de los lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.

Por todas las razones mencionadas anteriormente, los lechos fluidizados son apropiados para ciertas operaciones industriales. No obstante, presentan una serie de desventajas que impiden su utilización para algunas otras aplicaciones. Las principales desventajas de los lechos fluidizados son:

- La rápida mezcla de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. En el tratamiento continuo de sólidos, se tiene un producto no uniforme en composición y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión.
- La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas.

- ▶ Aunque existen formas de disminuir este efecto, en operaciones no catalíticas a alta temperatura la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma considerable.

La convincente ventaja, relativa a la economía que produce la utilización de los lechos fluidizados es la principal responsable de su desarrollo con éxito en operaciones industriales. Aun así, ese éxito pasa por entender y superar sus desventajas, las cuales pueden ser o no, resueltas a través del diseño, para lo cual la fluidodinámica computacional resulta una herramienta muy poderosa para ser utilizada en el correcto diseño y escalado de los lechos fluidizados.

2.7 – APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO: OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA

Tal como se mencionó en el [Capítulo I](#) del presente trabajo, los procesos termoquímicos son los que conducen a la transformación de la biomasa seca en compuestos gaseosos, líquidos o sólidos, que pueden ser utilizados como materias primas para, por ejemplo, la generación de energía. Estos procesos de conversión pueden clasificarse en cuatro grandes grupos ([Energía renovable - Energía biomasa, Secretaría de Energía Argentina, 2008](#)):

- ▶ **Combustión:** es el más sencillo y el más ampliamente usado. Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos (calefacción o cocción) o industriales (calor para procesos). Durante la combustión, la biomasa como combustible directo es quemada en presencia de exceso de aire con el objetivo de producir calor.
- ▶ **Pirolisis:** proceso por el cual se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa, para obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (efluentes piroleñosos) y gaseosos (gas pobre). Generalmente, el producto principal de la pirolisis es el carbón vegetal, considerándose a líquidos y gases como subproductos del proceso.
- ▶ **Licuefacción:** también conocida como licuefacción hidrotérmica ([Zhang y Zhang, 2019](#)), es un proceso de conversión termoquímico en medio acuoso complejo que incluye reacciones de hidrólisis, descomposición, isomerización y

deshidratación, y cuyo mecanismo de reacción no ha sido intensamente investigado o elucidado en la literatura hasta ahora. Se está volviendo un campo de estudio de gran interés ya que las condiciones de presión y temperatura bajo las cuales se desarrollan las reacciones son moderadas, lo cual permite obtener un biocombustible líquido con mayor eficiencia energética que con otros procesos.

🔗 **Gasificación:** Consiste en la transformación de biomasa sólida (fundamentalmente residuos forestales) en forma controlada y en presencia de oxígeno, de manera de producir un gas combustible denominado *gas pobre*, por su poder calorífico menor al del gas natural. La gasificación se realiza en un recipiente cerrado llamado *gasificador* en el cual se introduce el combustible sólido y una cantidad de aire u otro agente gasificador que provea una cantidad de oxígeno menor que la que se requeriría para una combustión completa. El gas pobre obtenido puede utilizarse luego en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor, o ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna que produzca luego energía mecánica.

2.7.1 – GASIFICACIÓN Y LECHOS FLUIDIZADOS

La gasificación y combustión son dos procesos termoquímicos estrechamente relacionados, pero hay una diferencia importante entre ellos, la gasificación almacena la energía en los enlaces químicos del producto gaseoso mientras que durante la combustión se rompen esos enlaces para liberar energía directamente. El proceso de gasificación desprende el hidrógeno y el carbono de la materia prima generando un gas combustible con una relación hidrógeno/carbón (H/C) superior a la de la biomasa original. La combustión oxida el hidrógeno y el carbono para convertirlos en agua y dióxido de carbono.

La gasificación tiene lugar a altas temperaturas y en un rango de presiones que pueden ir desde 1 a 33 atm (Ruiz y col., 2013). Las diferentes etapas de la gasificación de la biomasa serán a continuación descriptas y además pueden verse en la [Figura 2.8](#), cabiendo aclarar que dichas etapas se solapan y no hay un límite claro entre ellas.



Figura 2.8 – Etapas del proceso de gasificación (Ruiz y col., 2013).

- **Secado:** La biomasa forestal viene normalmente acompañada de una cantidad de humedad que va en desmedro de la eficiencia del proceso, dado que la energía utilizada en evaporar el agua se pierde. Por esto, los niveles de humedad máximos de la biomasa antes de entrar al gasificador son del 10 al 15%.
- **Pirolisis:** Como ya se mencionó, la pirolisis en si es un proceso termoquímico utilizado para convertir biomasa en un combustible de mayor poder calorífico. Ocurre a temperaturas mayores de 150 °C y deriva en la formación de un residuo sólido carbonoso conocido como *char*, junto con la emisión de algunos gases. Los principales componentes de esta fase gaseosa son H₂O, CO₂, H₂, hidrocarburos y pequeñas cantidades otros compuestos como ácidos orgánicos.
- **Oxidación:** o también llamada combustión parcial de algunos gases, vapores y el char por un agente de gasificación. Parte de estos compuestos se convierten en CO, CO₂ y H₂O. La energía necesaria para las etapas de pirolisis y gasificación es generada en esta etapa.
- **Gasificación:** en esta etapa el char producido durante la pirolisis es convertido principalmente en CO, H₂ y CH₄.

Las últimas dos etapas requieren de un medio como vapor, aire, u oxígeno para ordenar la estructura de la materia prima, con el fin de convertirla en un gas; también puede añadir hidrógeno al producto. Estos agentes gasificantes reaccionan con el carbono sólido e hidrocarburos más pesados para convertirlos en gases de bajo peso molecular como CO, H₂ y CH₄.

El poder calorífico y la composición del gas producido en un gasificador dependen en gran medida de la naturaleza y de la cantidad del agente gasificante utilizado. Si se utiliza oxígeno, los productos serán preferentemente CO y CO₂. El uso de oxígeno en exceso, determina la combustión de la biomasa con un gas producto no utilizable con fines energéticos en otra etapa. Si se utiliza vapor como agente gasificante, el gas

producto contendrá hidrógeno. Si en lugar de oxígeno, se utiliza aire, el nitrógeno actúa, diluyendo el producto. En la [Tabla 2.1](#) se muestran los intervalos de poder calorífico en función del medio utilizado en la gasificación. Cuando se utiliza oxígeno, el poder calorífico del gas obtenido supera al del gas generado a partir de usar vapor como medio y también al obtenido con aire.

Tabla 2.1. Poderes caloríficos de diferentes gases obtenidos a partir de la gasificación en diferentes medios.

| Medio | Poder Calorífico [Mj/Nm ³] |
|---------|--|
| Aire | 4-7 |
| Vapor | 10-18 |
| Oxígeno | 12-28 |

En las reacciones de gasificación, interactúa el char producido en la pirólisis con los gases del entorno. El char generado a partir de biomasa es muy reactivo dado que su porosidad se encuentra en el rango de 40 a 50 %, lo que le da una gran superficie de contacto con el gas ([Encinar y col., 2001](#)). El conjunto de reacciones consideradas en la gasificación se muestra en la [Tabla 2.2](#).

A la hora de seleccionar el tipo de gasificador debe tenerse en cuenta que este es el componente principal de una planta de gasificación, y es el responsable de que la producción del gas sintetizado sea lo más estable posible. El gasificador es donde la biomasa y el agente gasificador se mezclan en mayor o menor medida, en algunos casos acompañados de un material inerte o catalizador, y donde las reacciones del proceso de gasificación toman lugar.

Según [Van der Drift y col. \(2001\)](#) la tecnología de gasificación en lecho fluidizado es considerada una de las técnicas más adecuadas para convertir termoquímicamente diferentes combustibles en energía luego utilizable.

En este tipo de reactor la alimentación fresca de partículas de biomasa entra en contacto con un lecho caliente de sólidos, que, gracias a la agitación, lleva rápidamente a las nuevas partículas a la temperatura donde puede comenzar la pirólisis, produciendo el *char* y los respectivos gases inherentes al proceso. El alto grado de mezclado de los sólidos ayuda a mantener una temperatura relativamente uniforme en todo el reactor.

Tabla 2.2. Reacciones características del proceso de gasificación (Basu, 2010).

| Tipo de reacción | Reacción |
|--|---|
| Reacciones del carbón | |
| R1 (Reacción de Boudouard) | $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}$ |
| R2 (Reacción con vapor de agua) | $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}$ |
| R3 | $C + 2 H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74,8 \text{ kJ/kmol}$ |
| R4 | $C + 0,5 O_2 \leftrightarrow CO - 111 \text{ kJ/kmol}$ |
| R5 | $C + O_2 \leftrightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}$ |
| Reacciones de oxidación | |
| R6 | $CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}$ |
| R7 | $CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O - 803 \text{ kJ/mol}$ |
| R8 | $H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}$ |
| R9 | $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41,2 \text{ kJ/mol}$ |
| Reacciones de metanación | |
| R10 | $2CO + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}$ |
| R11 | $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}$ |
| R14 | $CO_2 + 4 H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2 H_2O - 165 \text{ kJ/mol}$ |
| Reacciones de reformado con vapor | |
| R12 | $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2 + 206 \text{ kJ/mol}$ |
| R13 | $CH_4 + 0,5 O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36 \text{ kJ/mol}$ |

Otra ventaja de este tipo de gasificador es que su mezclado vigoroso favorece a las fragmentaciones de la biomasa dando lugar al desprendimiento inicial de los volátiles y a la formación del char.

La agitación permite además gasificar diferentes tipos de biomasa (dependiendo la disponibilidad de esta con, por ejemplo, las estaciones del año). Es por esto que es una de las tecnologías preferidas para plantas de gasificación de biomasa a gran escala.

CAPÍTULO III

FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

| | |
|--|------|
| 3.1 - Introducción..... | 3.3 |
| 3.2 - Definición de la CFD..... | 3.3 |
| 3.2.1 - Aplicaciones de la CFD..... | 3.4 |
| 3.2.2 - Ventajas y desventajas..... | 3.5 |
| 3.3 - Como trabaja el software de CFD | 3.6 |
| 3.3.1 - Pre-procesamiento | 3.6 |
| 3.3.2 - Resolución..... | 3.8 |
| 3.3.2.1 - Ecuaciones fundamentales de fenómenos de transporte..... | 3.8 |
| 3.3.2.2 - Discretización en CFD..... | 3.9 |
| 3.3.2.3 - Pressure-based solver..... | 3.10 |
| 3.3.2.4 - Esquemas de interpolación..... | 3.11 |
| 3.3.2.5 - Factores de relajación..... | 3.11 |
| 3.3.2.6 - Condiciones de borde..... | 3.12 |
| 3.3.2.7 - Caracterización de las celdas..... | 3.13 |
| 3.3.2.8 - Criterios de convergencia..... | 3.13 |
| 3.3.3 - Post-procesamiento..... | 3.14 |
| 3.4 - Modelos y enfoques de ANSYS-Fluent 18.2 para simular lechos fluidizados..... | 3.15 |
| 3.4.1 - Simulación del lecho fijo: modelo de medio poroso..... | 3.15 |
| 3.4.1.1 - Limitaciones y limitaciones del modelo del medio poroso..... | 3.15 |
| 3.4.1.2 - Ecuaciones del modelo del medio poroso..... | 3.15 |
| 3.4.2 - Simulación del lecho fluidizado..... | 3.17 |
| 3.4.2.1 - Enfoque Euler-Lagrange..... | 3.17 |
| 3.4.2.2 - Enfoque Euler-Euler..... | 3.17 |
| 3.5 – Antecedentes de simulaciones por CFD..... | 3.18 |

CAPÍTULO III

FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

3.1 – INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describirán los conceptos básicos de la CFD, algunas de sus aplicaciones en la Ingeniería Química y otras áreas de desarrollo e investigación, como así también ventajas y desventajas de la CFD. Luego se describen las diferentes actividades involucradas en el proceso de simulación.

Finalmente se expondrán los diferentes modelos y enfoques disponibles en el *software* ANSYS-Fluent 18.2 para llevar a cabo las simulaciones del presente trabajo.

3.2 – DEFINICIÓN DE LA CFD

La fluidodinámica computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), es la ciencia que se ocupa de predecir: flujo de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa, cambios de fase, reacciones químicas y fenómenos relacionados; mediante la resolución numérica del conjunto de ecuaciones matemáticas que gobiernan esos procesos. Dicha resolución numérica se lleva a cabo con la ayuda de una computadora, que realiza los millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los fluidos con las estructuras complejas usadas en la ingeniería. Las ecuaciones de gobierno utilizadas en general son:

- Conservación de masa.
- Conservación de cantidad de movimiento.
- Conservación de energía.
- Conservación de especies.

El análisis por CFD es complementario a la experimentación, pudiendo reducirse el esfuerzo y el costo total requeridos para llevar adelante proyectos piloto y el posterior incremento de escala.

3.2.1 – APLICACIONES DE LA CFD

La fluidodinámica computacional tiene un amplio espectro de aplicaciones. Unas de las primeras se desarrollaron en la industria aeroespacial en los años 60, y se pueden sumar como ejemplos las aplicaciones en aerodinámica de vehículos, refrigeración de dispositivos electrónicos, piezas mecánicas, etc.

A partir de los años 90 se expandió de forma significativa al campo de la Ingeniería Química en aplicaciones y procesos industriales en los que interviene transferencia de calor, reacciones químicas, flujos bifásicos, cambios de fase, transferencia de masa y esfuerzos al interactuar los fluidos con sólidos, entre otras aplicaciones. Con el desarrollo de equipos informáticos de alta performance y los avances en técnicas numéricas y desarrollos de nuevos algoritmos, los Ingenieros Químicos comenzaron a explotar el potencial de las herramientas de CFD.

De forma general, la CFD permite el diseño detallado, la optimización y el diagnóstico de:

- Reactores catalíticos de lecho fijo y lechos fluidizados: gas-líquido, gas-sólido, líquido-sólido.
- Equipos de transferencia de calor: intercambiadores, hornos, calderas, secadores, etc.
- Tanques agitados (tanques de mezcla, reactores químicos).
- Separadores (decantadores, filtros, ciclones, membranas, etc.).
- Máquinas rotativas (extrusoras, bombas, compresores, turbinas, etc.).
- Mezcladores estáticos, distribuidores gas-líquido, tuberías, válvulas, etc.
- Sistemas de calefacción, ventilación, climatización y refrigeración.

En el campo del diseño de equipos, una de las utilidades que los Ingenieros Químicos dan a los programas de CFD es la posibilidad de desarrollar modelos que les permitan predecir la performance de nuevos diseños a partir del conocimiento de la geometría y los parámetros de operación. Esta capacidad permite el análisis de diseños que en otras ocasiones hubiesen quedado relegados por falta de recursos para los ensayos experimentales requeridos.

Finalmente, varios paquetes comerciales han incorporado las reacciones químicas en sus programas, permitiendo un rápido progreso del uso de la CFD dentro del campo de la Ingeniería de las Reacciones Químicas (Ranade, 2002).

3.2.2 – VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La predicción de los campos de flujo gas-sólido, en procesos tales como líneas de transporte neumático, reactores de lecho fluidizado, desecadores y precipitadores son cruciales para la operación y diseño de las de las plantas de proceso que emplean esos equipos. El uso de la CFD permite a los ingenieros obtener soluciones para problemas con geometrías y condiciones de borde complejas, dando los valores de presión, velocidad de fluido, temperaturas y concentración de fases o especies.

Las principales ventajas de la CFD se resumen a continuación:

- Provee flexibilidad para modificar los parámetros de diseño, sin que esto requiera costos adicionales, lo cual lo hace más económico que los experimentos de laboratorio o de campo, permitiendo a los ingenieros ensayar más alternativas de diseño que no serían factibles de otra manera.
- Tiene un tiempo de realización más rápido que la mayoría de los experimentos.
- Brinda la capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límite de funcionamiento, lo cual permite predecir o evitar accidentes.
- Guía a los ingenieros a la raíz del problema y es, por lo tanto, conveniente para la resolución de problemas.
- Provee información detallada del campo de flujo, especialmente en regiones donde las mediciones son difíciles o imposibles de obtener.

Los mayores inconvenientes de la CFD consisten en que no siempre es posible llegar a obtener resultados suficientemente precisos y la facilidad con que, en ocasiones, se pueden cometer errores groseros. Esto se debe a:

- La necesidad de simplificar el fenómeno a estudiar para que el *hardware* y el *software* sean capaces de tratarlo. El resultado será tanto más preciso cuando más adecuadas hayan sido las hipótesis y simplificaciones realizadas.

- Las limitaciones de los modelos existentes para tratar la turbulencia, el flujo bifásico, la combustión, etc.

3.3 – CÓMO TRABAJA EL SOFTWARE DE CFD

Los paquetes de *software* de CFD están organizados en tres bloques que permiten: introducir los parámetros del problema, efectuar la resolución, y lograr la visualización de los resultados:

1. Pre-procesamiento
2. Resolución
3. Post-procesamiento

3.3.1 – PRE-PROCESAMIENTO

Esta es la primera etapa e incluye las siguientes actividades:

- Desarrollo de la geometría, lo cual da forma y delimita el dominio del problema.
- Generación del mallado: la subdivisión del dominio en pequeños volúmenes de control, no superpuestos.
- Especificación de las propiedades del fluido y/o sólidos.
- Definición de las condiciones de frontera apropiadas en los volúmenes de control que coinciden o tocan los bordes del dominio.

En el presente trabajo todas las actividades antes mencionadas se llevaron adelante con el *software* ANSYS-Fluent 18.2 partiendo desde el ambiente de trabajo *Workbench* e iniciando un Sistema de Análisis con la opción *Fluid Flow (FLUENT)*, de esta manera se habilitan opciones sucesivas (Figura 3.1) para desarrollar la geometría, el mallado, cargar propiedades de los materiales, definir las condiciones de borde del problema y establecer los modelos que serán elegidos para representar el mismo; finalmente se procede a la simulación propiamente dicha y a la visualización de los resultados.

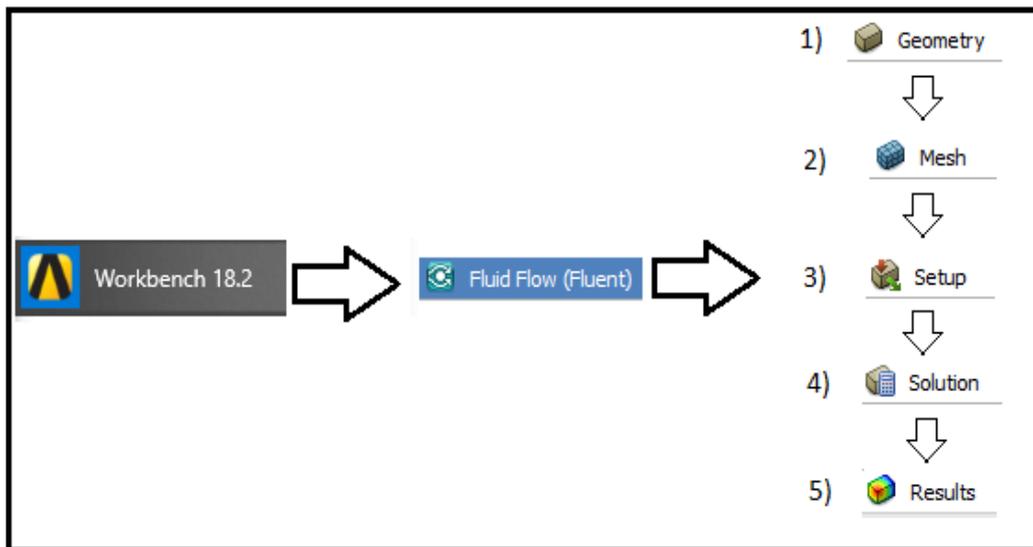


Figura 3.1 – Secuencia de opciones ofrecidas por ANSYS-Fluent 18.2 para trabajar sobre un problema de flujo de fluidos. Adaptado de Garrido Makinistian (2015).

Una vez construida la geometría, propia del dominio del problema a estudiar, se procede al mallado. Dependiendo de si la geometría es en 2D o 3D y la complejidad de la misma, existen distintos tipos de celdas que podrán constituir la malla. Para el caso de una geometría en 2D los tipos de celdas pueden ser triangulares o cuadriláteros y para el caso de 3D pueden elegirse tetraedros, hexaedros, pirámides y poliedros; y además estas celdas pueden ser uniformes o irregulares a lo largo del mallado e incluso pueden estar combinadas.

Debido a que el proceso de resolución implica el cálculo de las ecuaciones de gobierno en cada uno de los volúmenes o áreas de control, los resultados obtenidos son altamente dependientes del tamaño y cantidad de estos. Si el tamaño de las unidades de control es grande se requerirá una pequeña cantidad de ellos para cubrir la geometría, en este caso la cantidad total de ecuaciones a resolver será pequeña y por lo tanto requerirá de pocos recursos computacionales y el tiempo de computo será pequeño, sin embargo, los resultados no serán precisos debido a que se cuenta con pocos puntos de cálculo para formar la solución final. Por otro lado, si el tamaño de las unidades de control es pequeño, se requerirá una gran cantidad de ellas para cubrir la geometría, en este caso la cantidad total de ecuaciones a resolver será muy alta y por lo tanto requerirá de una gran cantidad de recursos computacionales y tiempo de computo, sin embargo, los resultados obtenidos

tendrán una alta precisión debido a que se cuenta con una gran cantidad de puntos de cálculo para formar la solución final. Por este motivo se debe buscar un equilibrio entre la cantidad de volúmenes o áreas de control, recursos computacionales, tiempo de cómputo y grado de precisión requerido en los resultados, para lo cual se lleva a cabo el proceso de validación de la malla a utilizar.

El proceso de validación de la malla consiste en realizar una serie de simulaciones, todas ellas con los mismos parámetros y modelos, pero cambiando la malla utilizada en cada una de las simulaciones. Durante las simulaciones se realiza el seguimiento de algunos parámetros de interés (presión, fracción de sólido, temperaturas, velocidades, etc.), luego se comparan los valores de estos parámetros obtenidos con las distintas mallas utilizadas, y se escoge aquella malla que tiene la menor cantidad de volúmenes de control y que es capaz de reproducir los resultados con una precisión similar a la de la malla con la mayor cantidad de volúmenes de control que se halla simulado.

3.3.2 – RESOLUCIÓN

Luego de cumplida la etapa de generación de la malla, se da comienzo a la fase de resolución propiamente dicha. Para ello se deben establecer las condiciones de contorno, condiciones iniciales, propiedades de los materiales fluido y sólido que intervienen en la simulación, modelos de turbulencia, métodos de resolución y parámetros de convergencia.

En este trabajo se utilizó la versión Académica del *software* ANSYS-Fluent 18.2. Este programa cuenta con dos algoritmos de resolución, *Pressure-Based Solver* y *Density-Based Solver*, de los cuales se escogió el esquema *Pressure-Based Solver*, ya que es el más adecuado para el caso particular de estudio, en el que se aplica el modelo de medio poroso para la simulación del lecho fijo y el enfoque *Euler-Euler*, con el modelo Euleriano para la simulación del lecho fluidizado.

3.3.2.1 - ECUACIONES FUNDAMENTALES DE FENÓMENOS DE TRANSPORTE

Se presentan las ecuaciones fundamentales que gobiernan la resolución de la problemática abordada en este trabajo. La simulación resuelve numéricamente el

conjunto de ecuaciones en derivadas parciales que describen la conservación de masa y de momento o de Navier-Stockes.

↳ Conservación de Masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.1)$$

↳ Conservación de Momento:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (3.2)$$

Donde u_i es la componente de la velocidad, p es la presión y ρ la densidad.

En la CFD, las ecuaciones son discretizadas para resolver el campo de fluido numéricamente.

3.3.2.2 – DISCRETIZACIÓN EN CFD

La resolución de las ecuaciones de gobierno se puede realizar de diferentes formas, de acuerdo al esquema de discretización utilizado.

El método de discretización utilizado por el *software* ANSYS-Fluent 18.2 es el de volúmenes finitos (MVF), basados en la forma integral de las ecuaciones en derivadas parciales a ser resueltas (ecuaciones (3.1) y (3.2)). El sistema de ecuaciones es escrito de tal forma que puede ser resuelto para un volumen finito dado (o celda). El dominio computacional es dividido en volúmenes finitos y luego, para cada volumen, las ecuaciones de gobierno son resueltas. El sistema de ecuaciones resultantes usualmente involucra flujos de las variables conservadas (masa o energía) y así el cálculo de flujos es muy importante en este método. La solución resultante es discreta y las variables están ubicadas en el centro de las celdas en lugar de estar en los puntos nodales.

El método de volúmenes finitos consiste en:

- ↳ División del dominio en volúmenes de control, usando una malla computacional.
- ↳ Integración de las ecuaciones de gobierno en los volúmenes de control individuales para construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes discretas (*incógnitas*) tales como velocidades, presión temperatura, etc.
- ↳ Linealización de las ecuaciones discretizadas y solución del sistema de ecuaciones lineales resultante para dar valores actualizados de las variables dependientes.

3.3.2.3 – PRESSURE-BASED SOLVER

Este esquema emplea un algoritmo que pertenece a una clase general de métodos llamados métodos de proyección (Chorin, 1968), en donde la limitación de conservación de masa (continuidad) del campo de velocidades, es conseguida mediante la resolución de una ecuación de presión (o corrección de presión). La ecuación de presión es derivada de las ecuaciones de continuidad y de momento en tal forma que el campo de velocidad, corregido por la presión, satisface la continuidad. Dado que las ecuaciones de gobierno son no lineales y están acopladas unas con otras, el proceso de resolución es iterativo, en donde el conjunto entero de ecuaciones de gobierno es resuelto repetidamente hasta que la solución converge.

Cada iteración en el proceso de resolución incluye los siguientes pasos:

1. Se actualizan las propiedades del fluido (tales como, densidad, viscosidad, calor específico) con los valores de la solución actual. En la primera iteración los valores se toman de las condiciones iniciales.
2. Se resuelven las ecuaciones de momento, una tras otra, usando los valores recientemente actualizados de presión y flujos de masa en las caras de las celdas, para obtener el campo de velocidades.
3. Se resuelve la ecuación de corrección de presión usando el campo de velocidades y flujos de masa recientemente obtenidos.
4. Se corrigen: los flujos de masa en las caras de las celdas, presión y campo de velocidades usando la corrección de presión obtenida en el paso 3.
5. Se resuelven ecuaciones adicionales para escalares, si se incluye alguno, tales como, turbulencia, energía y especies usando los valores actualizados de las variables del paso anterior.
6. Se actualizan los términos fuente originados de las interacciones entre las diferentes fases.
7. Se verifica la convergencia de las ecuaciones.

Estos pasos se realizan hasta que se alcanza el criterio de convergencia escogido.

3.3.2.4 - ESQUEMAS DE INTERPOLACIÓN

La integración sobre el volumen de control de las ecuaciones de conservación requiere calcular los valores de unas variables escalares ϕ en las caras de cada celda para determinar los flujos convectivos y difusivos. Para ello se interpola el valor de la variable ϕ del centro de cada celda a la cara de la misma celda. Existen diferentes esquemas de interpolación. La aplicación de un esquema específico para una variable depende, entre otros, del alineamiento del mallado al campo de flujo. Los esquemas de interpolación de mayor orden presentan una mayor precisión, ya que los esquemas de primer orden introducen dispersión numérica cuando el flujo de fluido es oblicuo al alineamiento del mallado. Sin embargo, los esquemas de interpolación de orden mayor presentan un proceso de solución menos estable. El esquema de interpolación usado para la simulación del lecho en reposo es SIMPLE (*Semi-implicit Method for Pressure-Linked Equations*) (Patankar, 1980), mientras que para la simulación del lecho fluidizado se empleó *Phase Coupled SIMPLE*, el cual es una extensión del algoritmo SIMPLE para flujos multifásicos (Vasquez e Ivanov, 2000).

3.3.2.5 - FACTORES DE RELAJACIÓN

Debido a la no linealidad del sistema de ecuaciones es necesario controlar el cambio en el escalar ϕ de una iteración a la siguiente. Este cambio es realizado mediante los factores de relajación, los cuales reducen el cambio del escalar ϕ entre una iteración y la siguiente. El nuevo valor de la variable ϕ_2 , en cada celda depende del valor antiguo ϕ_1 , del cambio calculado $\Delta\phi$ y del valor del factor de relajación β , según la expresión:

$$\phi_2 = \phi_1 + \beta \Delta\phi \quad (3.3)$$

Para la simulación del lecho fijo y lecho fluidizado, los factores de relajación utilizados fueron diferentes a los que el software propone por defecto debido a la inestabilidad que presentaba la solución.

En la [Tabla 3.1](#) se detallan los valores de los factores de relajación utilizados, tanto en la simulación del lecho en reposo como en la simulación del lecho fluidizado.

Tabla 3.1 - Factores de relajación utilizados en las simulaciones

| Factores de Relajación | | |
|------------------------|-----------------|------------------|
| Variable | Lecho en Reposo | Lecho Fluidizado |
| Presión | 0,3 | 0,5 |
| Densidad | 1 | 1 |
| Fuerzas de Cuerpo | 1 | 1 |
| Momento | 0,2 | 0,2 |
| Fracción Volumétrica | - | 0,4 |
| Temperatura Granular | - | 0,2 |

3.3.2.6 – CONDICIONES DE BORDE

Establecer las condiciones de borde consiste en fijar los valores de ciertas variables en los límites del dominio. Adicionalmente deben establecerse las condiciones iniciales de las variables, a partir de cuyos valores partirá el proceso iterativo.

Las condiciones de contorno aplicadas en las simulaciones de este trabajo son las siguientes: *velocity inlet*, *pressure outlet*, *wall*.

➤ **Velocity Inlet:** Se utiliza para definir la velocidad de gas de entrada, junto con todas las propiedades escalares de importancia tales como:

- Velocidad del gas de entrada (dirección y magnitud).
- Temperatura del gas de entrada (cálculos relacionados con la energía).
- Parámetros de turbulencia (cálculos correspondientes con la turbulencia).
- Fracción másica inicial de cada una de las especies químicas que intervienen en la simulación (modelado de transporte y reacción de las especies).

➤ **Pressure Outlet:** Se utiliza para definir la presión manométrica en la frontera de salida del sistema. Se puede ingresar la siguiente información:

- Presión estática.
- Condiciones de retro flujo.
- Condiciones de borde para fases discretas.

➤ **Wall:** Esta frontera es utilizada para limitar regiones sólidas y fluidas. Se puede ingresar la siguiente información:

- Condiciones de movimiento de pared (para paredes que rotan).
- Condiciones de cizallamiento (para deslizamientos de pared).
- Rugosidad de pared (para flujos turbulentos).
- Condiciones de borde para las especies.
- Condiciones de borde para reacciones químicas (para reacciones superficiales).

3.3.2.7 – CARACTERIZACIÓN DE LAS CELDAS

Las celdas que conforman el dominio pueden definirse como fluido, sólido, o medio poroso. En el caso del lecho en reposo, todas las celdas que conforman el dominio son definidas como una zona porosa y en el caso del lecho fluidizado, las celdas son definidas como fluido.

- **Fluido:** Una zona definida como fluido es un grupo de volúmenes de control para los cuales todas las ecuaciones previamente activadas son resueltas. El único requisito de entrada para una zona fluida es el tipo de material fluido. Se debe indicar qué material contiene la zona fluida. En el caso del lecho fluidizado, la zona fluida contiene a las dos fases, el aire y el sólido.
- **Zona porosa:** Es posible definir una zona sobre la cual se aplicará el modelo de medio poroso. La zona porosa es modelada como un tipo especial de fluido. Se debe indicar el fluido que fluye a través del medio poroso, los coeficientes de resistencia viscosa e inercial y la porosidad del medio.

3.3.2.8 - CRITERIOS DE CONVERGENCIA

Se consideran los siguientes criterios de convergencia:

- **Criterios de convergencia de valores residuales:** La convergencia numérica del modelo fue evaluada en base a la distribución de los residuos normalizados de las variables calculadas. ANSYS-Fluent 18.2 presenta permanentemente un gráfico de los residuos que permite realizar un seguimiento durante el desarrollo del cálculo.

Para el caso del lecho fluidizado, el cual se simuló en estado transitorio, se utilizó un criterio de convergencia de 10^{-3} para cada paso de tiempo; esto significa que cuando

los residuos alcanzan un valor por debajo de 10^{-3} se da por finalizada la simulación para ese paso de tiempo y se pasa al siguiente paso, además se estableció un máximo de 20 iteraciones por paso de tiempo.

➤ **Criterio de estabilidad:** el valor de la variable de interés, en este caso la presión, no debe variar significativamente de una iteración a otra, como así también los valores de los residuos.

Para el caso del lecho en reposo, el cual se simuló en estado estacionario, se aplicó este criterio. Se observó que alrededor de las 50 iteraciones, los valores de la presión y de los residuos se volvieron prácticamente constantes. Se escogió realizar 200 iteraciones para asegurar la estabilidad en todo el rango de velocidades analizado.

3.3.3 – POST- PROCESAMIENTO

Esta es la etapa final de un estudio por CFD, en ella se lleva a cabo la visualización de los resultados obtenidos. A diferencia de los métodos experimentales, la simulación por CFD proporciona datos de presión, velocidad, densidad, temperatura y otros valores de interés en todos los puntos del dominio de flujo simulado, por lo tanto, al finalizar la simulación se debe realizar el tratamiento de estos datos, con el fin de obtener solo aquellos que tienen importancia práctica en el estudio que se está realizando. ANSYS-Fluent 18.2 cuenta con una serie de herramientas muy útiles para la visualización de los resultados, entre las que se incluyen:

- Diagramas vectoriales del campo de velocidades.
- Diagramas de contorno, de presión, fracción de sólido, etc.
- Trazado de superficies en dos y tres dimensiones.
- Trazado de líneas de corriente.

ANSYS-Fluent 18.2 también brinda la posibilidad de exportar los resultados para poder ser analizados con otro *software*.

3.4 – MODELOS Y ENFOQUES DE ANSYS-FLUENT 18.2 PARA SIMULAR LECHOS FLUIDIZADOS

Se expondrán los diferentes modelos y enfoques disponibles en el *software* para llevar a cabo las simulaciones, tanto para zona operativa de lecho fijo, como para la de lecho fluidizado.

3.4.1 – SIMULACIÓN DE LECHO FIJO: MODELO DE MEDIO POROSO

En la Ingeniería Química, el modelo de medio poroso 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, distribuidores de flujo y bancos de tubos.

3.4.1.1 - LIMITACIONES Y SUPOSICIONES DEL MODELO DE MEDIO POROSO

El modelo incorpora y determina empíricamente una resistencia al flujo en la región definida como “porosa”. Las siguientes condiciones y limitaciones caracterizan éste modelo:

- El volumen físicamente presente en una región empaquetada, no está representado. ANSYS-Fluent 18.2, por defecto, utiliza y reporta la velocidad superficial en el interior del medio poroso, basado en la velocidad de flujo volumétrico, para garantizar la continuidad de los vectores de velocidad a través de la interface del medio poroso.
- Los efectos sobre el campo de la turbulencia sólo son aproximados.
- En general el modelo de medio poroso asume que la porosidad es isotrópica y, en la realidad, esta puede variar con el tiempo y el espacio.
- Los términos de resistencia de momento y fuentes de calor son calculados separadamente para cada fase.
- La interacción entre un medio poroso y ondas de choque no son considerados.

3.4.1.2 - ECUACIONES DEL MODELO DE MEDIO POROSO

El medio poroso está modelado por las ecuaciones estándar del flujo de fluidos a las que se les adiciona un término fuente de momento, que representa las fuerzas de

resistencia del material sólido en el fluido. El término fuente, la ecuación (3.4), está formado por dos partes: un término de pérdidas viscosas (Ley de Darcy), y un término de pérdidas inerciales.

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho u u_j \right) \quad (3.4)$$

Donde S_i es el término fuente para la ecuación de momento “ i ” (con $i = x, y$ o z), D y C son matrices establecidas y u_j son las componentes de la velocidad. Este sumidero de momento contribuye al gradiente de presión en las celdas porosas, creando una caída de presión que es proporcional a la velocidad del fluido en la celda.

Para el caso más simple de medio poroso homogéneo:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i \right) \quad (3.5)$$

Donde α es la permeabilidad del medio poroso y C_2 el factor de resistencia inercial.

👉 **Ley de Darcy en el medio poroso:** En flujos laminares a través de medios porosos, la caída de presión es generalmente proporcional a la velocidad y la constante C_2 puede ser considerada igual a cero. Ignorando la aceleración convectiva y la difusión, el modelo de medio poroso se reduce a la ley de Darcy:

$$\nabla p = - \frac{\mu}{\alpha} \vec{u} \quad (3.6)$$

👉 **Pérdidas inerciales en el medio poroso:** a velocidades de flujo altas, la constante C_2 en la ecuación (3.5) provee una corrección para las pérdidas inerciales en el medio poroso. Ésta constante puede ser vista como un coeficiente de pérdida por unidad de longitud a lo largo de la dirección de flujo, permitiendo por eso a la pérdida de carga ser especificada como una función de las cargas de velocidad. Para problemas en los que la permeabilidad es elevada (bancos de tubos, placas perforadas), el término de pérdidas viscosas puede ser omitido en la ecuación (3.4) quedando:

$$\Delta p = - \sum_{j=1}^3 C_{zij} \left(\frac{1}{2} \rho u_j |u| \right) \quad (3.7)$$

3.4.2 – SIMULACIÓN DE LECHO FLUIDIZADO

En general es posible simular un problema de flujo multifásico por CFD aplicando dos enfoques alternativos: el enfoque Euler-Lagrange y el enfoque Euler-Euler.

3.4.2.1 – ENFOQUE EULER-LAGRANGE

El enfoque Euler-Lagrange cuenta con el modelo Lagrangiano de fase discreta, en el cual la fase fluida es tratada como una fase continua por medio de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que la fase dispersa es resuelta por medio del seguimiento de un gran número de partículas, gotas o burbujas, a través del campo de flujo calculado. La fase dispersa puede intercambiar momento, masa y energía con la fase fluida.

Una asunción fundamental hecha en este modelo es que la fase dispersa ocupa una pequeña fracción de volumen, incluso cuando el flujo másico de partículas es mayor que el de la fase fluida. Esto lo hace inapropiado para modelar mezclas liquido-liquido, lechos fluidizados, o cualquier otra aplicación donde la fracción volumétrica de la segunda fase no pueda ser despreciada.

3.4.2.2 – ENFOQUE EULER-EULER

En el enfoque Euler-Euler, las diferentes fases son tratadas matemáticamente como fases continuas e interpenetrantes. Dado que el volumen de una fase no puede ser ocupado por las otras fases, se 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. Estas ecuaciones son cerradas por medio de relaciones constitutivas que son obtenidas de información empírica, o en el caso de flujo granular, por medio de la aplicación de la teoría cinética.

ANSYS-Fluent 18.2 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.

En el caso particular del modelo Euleriano podemos decir que es el modelo multifásico más complejo con el que cuenta ANSYS-Fluent 18.2. Este resuelve un conjunto de n ecuaciones de momento y continuidad para cada fase. El acople de estas ecuaciones es alcanzado a través de la presión (que es la misma para todas las fases) y los coeficientes de intercambio entre fases. La forma en la cual este acople es tratado depende del tipo de fases involucradas, los flujos granulares (fluido-sólido) son resueltos de forma diferente que los flujos no granulares (fluido-fluido). Para flujos granulares, las propiedades son obtenidas de la aplicación de la teoría cinética. Las aplicaciones del modelo multifásico Euleriano incluyen columnas de burbujeo, *risers*, suspensiones de partículas y lechos fluidizados.

Para poder resolver la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para la fase fluida, se requiere calcular previamente el coeficiente de intercambio sólido-fluido K_{pq} , que considera las interacciones existentes entre las partículas y el gas en un lecho fluidizado. Se han reportado, en la literatura abierta, numerosas correlaciones empíricas para el cálculo de dicho coeficiente. El *software* ANSYS-Fluent 18.2 presenta los siguientes modelos disponibles para su cálculo:

- Modelo Syamlal O'Brien.
- Modelo Wen-Yu.
- Modelo Gidaspow.

3.5 – ANTECEDENTES DE SIMULACIONES POR CFD

Uno de los primeros intentos para formular una teoría coherente para describir el campo de flujo alrededor de una burbuja que asciende, se remonta a los años 60, con la teoría de las dos fases presentada por Davidson y Harrison (1963). Desde entonces, una importante cantidad de análisis teóricos han sido dirigidos al estudio de la estabilidad de las suspensiones fluidizadas con el fin explicar el origen físico de las burbujas en un lecho fluidizado gas-sólido. Varios de esos trabajos han proporcionado alguna información sobre el comportamiento de los sistemas fluidizados estables y la transición hacia lechos

fluidizados inestables (burbujeantes), como resumieron [Jackson \(2000\)](#) y [Gibilaro \(2001\)](#). La mayoría de esos trabajos consideran a las fases gas y sólida como continuas e interpenetrantes (enfoque Euleriano).

Numerosas simulaciones en dos dimensiones de lechos burbujeantes fluidizados por gas, basadas en el enfoque Euleriano (*Eulerian-Eulerian*), han sido reportadas desde comienzos de los 90, la mayor parte de ellas desarrolladas para lechos conformados por un solo tipo de partículas.

[Ding y Gidaspow \(1990\)](#) simularon un lecho fluidizado burbujeante en dos dimensiones de partículas Geldart B con un jet de gas en la entrada, validaron los resultados de las simulaciones comparando el promedio temporal de los espacios vacíos con aquellos medidos experimentalmente en un lecho fijo bidimensional.

[Van Wachem y col. \(1998\)](#) validaron las simulaciones realizadas con el modelo Euleriano gas-sólido, de un lecho fluidizado burbujeante, con correlaciones de tamaño de burbujas y velocidad de ascenso disponibles en la literatura. Compararon el tamaño de las burbujas obtenidos de las simulaciones en dos dimensiones de un lecho fluidizado burbujeante de partículas Geldart B con los tamaños predichos por la correlación de [Darton y col. \(1977\)](#). Sus resultados mostraron que los diámetros de burbujas simulados fueron levemente menores en la parte más alta del lecho.

[Taghipour y col. \(2005\)](#) investigaron, tanto experimental como computacionalmente, la hidrodinámica de un lecho de partículas Geldart B de TiO_2 , fluidizado con aire. Aplicaron el enfoque Euleriano y analizaron la validez de diversos modelos de arrastre. Los autores señalan que las predicciones que arrojan las simulaciones realizadas concuerdan con los datos experimentales.

[Hulme y col. \(2005\)](#) realizaron simulaciones en dos dimensiones de un reactor en lecho fluidizado gas-sólido para la producción de polietileno usando el enfoque Euleriano, para determinar el efecto de algunos parámetros de la simulación como: el paso de tiempo, los diferentes métodos de resolución y las ecuaciones de cierre en las propiedades de las burbujas (fundamentalmente el diámetro de las burbujas). Los tamaños de burbujas obtenidos de las simulaciones fueron comparados con los tamaños experimentales obtenidos por fluoroscopia de rayos X, los resultados demostraron que los diámetros de burbujas promedio eran comparables.

Duarte y col. (2008) aplicaron el modelo Euleriano para simular la fluidodinámica de lechos fluidizados de chorro, con geometrías cónicas. Compararon los resultados de las simulaciones por CFD con datos obtenidos a partir de correlaciones empíricas y mostraron que los resultados obtenidos en las simulaciones mostraban concordancia con los valores calculados.

Reuge y col. (2008) simularon un lecho de partículas Geldart B, operado en los regímenes de burbujeo y slug. Compararon los resultados de simulaciones 2D, 3D y 2D axisimétrico, concluyendo que las simulaciones en 2D son altamente recomendables ya que permiten reducir el tiempo de computo, manteniendo la precisión. Con respecto a las simulaciones 2D axisimétricas observaron cierta subestimación de la fracción volumétrica del sólido en el centro de la columna del lecho.

Asegehegn y col. (2011) realizaron simulaciones de un lecho fluidizado burbujeante bidimensional con tubos horizontales inmersos, usando el enfoque Euleriano. Investigaron la influencia de los tubos inmersos, las diferentes técnicas de análisis de datos, y el periodo de tiempo necesario para promediar los datos en las características fluidodinámicas del lecho y las burbujas. Los resultados fueron comparados con datos experimentales y correlaciones disponibles en la literatura.

Finalmente, resulta relevante mencionar el trabajo de Sau y Biswal (2010) en el que comparan los datos experimentales obtenidos en un lecho cónico en el que se fluidizan dos tipos de partículas (esferas de vidrio de 2 mm de diámetro y partículas no esféricas de dolomita de 2,215 mm de diámetro), con los resultados calculados a partir de simulaciones en dos dimensiones utilizando el *software* ANSYS-Fluent con el modelo multifásico Euleriano y el modelo de arrastre de Gidaspow. Los parámetros comparados fueron pérdida de carga y expansión del lecho. Los autores encontraron una buena concordancia entre los resultados de las simulaciones y los valores experimentales, siendo las pérdidas de carga simuladas ligeramente inferiores a las experimentales.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FLUIDIZACIÓN DEL SISTEMA

BINARIO ARENA-BIOMASA

| | |
|--|------|
| 4.1 - Introducción..... | 4.3 |
| 4.2 – Sección I: materiales, equipo experimental y metodología | 4.3 |
| 4.2.1 – Caracterización de las partículas..... | 4.3 |
| 4.2.2 – Materiales utilizados | 4.5 |
| 4.2.3 – Descripción del equipo experimental..... | 4.7 |
| 4.2.4 – Procedimiento experimental..... | 4.7 |
| 4.3 – Sección II: resultados experimentales..... | 4.9 |
| 4.3.1 – Lecho de partículas de arena | 4.9 |
| 4.3.2 – Lecho de partículas de biomasa | 4.10 |
| 4.3.3 – Mezclas binarias arena-biomasa | 4.13 |
| 4.3.4 – Comparación de las experiencias realizadas | 4.15 |

CAPÍTULO IV

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FLUIDIZACIÓN DEL SISTEMA BINARIO ARENA-BIOMASA

4.1 - INTRODUCCIÓN

Este capítulo se divide en dos secciones. En la primera sección, se describe el equipo utilizado y su funcionamiento, los materiales con los que se realizaron las experiencias, y la metodología utilizada para el cálculo de las velocidades de mínima fluidización. Dichas experiencias fueron realizadas en el Laboratorio de Ingeniería de Reactores y Procesos Químicos del PROBIEN (CONICET-UNCo).

En la segunda sección, se presentan los resultados obtenidos de la velocidad de mínima fluidización, junto con los gráficos característicos de este tipo de experiencias, para los materiales puros (arena y biomasa) y para las diferentes mezclas ensayadas.

4.2 – SECCIÓN I: MATERIALES, EQUIPO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

4.2.1 - CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

Las partículas involucradas en los procesos de fluidización pueden tener una forma cercana a una esfera perfecta, como así también formas irregulares. En cualquiera de estos casos se busca caracterizar geométricamente a la partícula con una dimensión, que en el caso de una esfera es el diámetro. Pero para las partículas irregulares es necesario recurrir a la *Teoría de la Esfera Equivalente*. La idea es relacionar algunas propiedades geométricas de la partícula irregular con las correspondientes a una esfera y calcular, a partir de estas relaciones, un *diámetro equivalente*. Algunas de las definiciones de diámetro equivalente más utilizadas en la bibliografía son las siguientes:

➤ **Diámetro de una esfera de volumen equivalente:** es el diámetro de una esfera que posee el mismo volumen (V) que la partícula que se desea caracterizar.

$$d_v = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3} \quad (4.1)$$

▷ **Diámetro de una esfera de superficie equivalente:** es el diámetro de una esfera que posee la misma superficie externa (S) que la partícula que se desea caracterizar.

$$d_{sup} = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{1/2} \quad (4.2)$$

▷ **Diámetro de una esfera de superficie por unidad de volumen equivalente:** es el diámetro de una esfera que posee la misma relación de superficie externa por unidad de volumen que la partícula que se desea caracterizar, también se lo denomina diámetro de Sauter.

$$\frac{S}{V} = \frac{\pi d_{sv}^2}{\frac{\pi d_{sv}^3}{6}} = \frac{6}{d_{sv}} \quad (4.3)$$

$$d_{sv} = \frac{6V}{S} \quad (4.4)$$

Para una muestra de partículas que posea una distribución de tamaños, el d_{sv} se calcula con la ecuación (4.5), siendo d_i el diámetro medio de cada una de las partículas presentes en la muestra y x_i la fracción másica de partículas de la muestra de diámetro d_i .

$$d_{sv} = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_i}} \quad (4.5)$$

En este trabajo se utilizará el diámetro de Sauter para caracterizar las partículas de biomasa, siguiendo la recomendación de Ozahi y col. (2008).

Las partículas también suelen caracterizarse según su esfericidad, que es una medida relacionada con la cercanía de una partícula a una esfera perfecta. Esta propiedad se calcula como:

$$\varphi = \frac{\text{área superficial de una esfera que tiene igual volumen que la partícula}}{\text{área superficial de la partícula}}$$

$$\varphi = \frac{\pi d_v^2}{\pi d_s^2} = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \quad (4.6)$$

Donde $\varphi \leq 1$.

4.2.2 – MATERIALES UTILIZADOS

La biomasa utilizada fue aserrín proveniente del aserradero Abra Ancha, localizado en Aluminé, provincia del Neuquén. Como material inerte, para mejorar la fluidización, se utilizó arena proveniente del Río Paraná, utilizada en la industria para realizar trabajos abrasivos de arenado, previos al recubrimiento anticorrosivo de tanques y cañerías. Este tipo de partículas de arena se caracteriza por su esfericidad cercana a la unidad.

Ambos materiales fueron clasificados empleando tamices estándar de la marca *Zonytest* y un equipo vibrador, con el objetivo de seleccionar el tamaño de partícula a utilizar en los ensayos. Para realizar el análisis granulométrico de la biomasa, se dispuso un tren de tamizado según se lo indica en la [Tabla 4.1](#), y con el objetivo de utilizar tanto en los ensayos experimentales como en las simulaciones, un tamaño acotado de partícula pero representativo de la muestra original, se calculó el diámetro de Sauter con la ecuación (4.5) de la muestra retenida en dos mallas, las #30 y #40, que representa un 53,89% del total de la biomasa tamizada (80,67 gr sobre un total de 149.68 gr de muestra). El valor obtenido fue de 0.70 mm.

Tabla 4.1 - Análisis granulométrico de la muestra de biomasa.

| N° Tamiz | Tamaño abertura [mm] | Tamaño medio de sólido [mm] | Retención por tamiz [gr] | Retención acumulada [gr] | Pasante [gr] | Retención por tamiz % | Retención acumulada % |
|-----------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| 4 | 4,75 | --- | 3,27 | 3,27 | 146,41 | 2,18 | 2,18 |
| 8 | 2,36 | 3,555 | 6,88 | 10,15 | 139,53 | 4,60 | 6,78 |
| 16 | 1,18 | 1,77 | 14,68 | 24,83 | 124,85 | 9,81 | 16,59 |
| 30 | 0,6 | 0,89 | 50,88 | 75,71 | 73,97 | 33,99 | 50,58 |
| 40 | 0,425 | 0,5125 | 29,79 | 105,5 | 44,18 | 19,90 | 70,48 |
| 50 | 0,3 | 0,3625 | 16,07 | 121,57 | 28,11 | 10,74 | 81,22 |
| 70 | 0,212 | 0,256 | 18,73 | 140,3 | 9,38 | 12,51 | 93,73 |
| 100 | 0,15 | 0,181 | 4,24 | 144,54 | 5,14 | 2,83 | 96,57 |
| 200 | 0,075 | 0,1125 | 4,58 | 149,12 | 0,56 | 3,06 | 99,63 |
| Fondo | <0,075 | --- | 0,56 | 149,68 | 0 | 0,37 | 100,00 |

Para la granulometría de la arena se dispuso el sistema de tamices mostrado en la [Tabla 4.2](#). Se consideró al tamaño medio del retenido en la malla #40, de 0.5125 mm, como un tamaño representativo del total de la muestra, dado que el retenido en este tamiz

y en los tamices inmediatamente superior e inferior (#30 y #70) significan un 89,86% del total de la muestra de arena tamizada (179.72 gr sobre un total de 200.00 gr).

Tabla 4.2 - Análisis granulométrico de la muestra de arena.

| N° Tamiz | Tamaño abertura [mm] | Tamaño medio de sólido [mm] | Retención por tamiz [gr] | Retención acumulada [gr] | Pasante [gr] | Retención por tamiz % | Retención acumulada % |
|-----------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| 18 | 1,000 | --- | 1,49 | 1,49 | 198,51 | 0,74 | 0,74 |
| 30 | 0,600 | 0,8 | 68,99 | 70,48 | 129,52 | 34,49 | 35,24 |
| 40 | 0,425 | 0,5125 | 45,97 | 116,45 | 83,55 | 22,99 | 58,22 |
| 70 | 0,212 | 0,3175 | 64,76 | 181,21 | 18,78 | 32,382 | 90,61 |
| 120 | 0,125 | 0,1675 | 6,37 | 187,59 | 12,41 | 3,19 | 93,79 |
| Fondo | <0,125 | --- | 12,41 | 200 | 0 | 6,21 | 100 |

Otra de las propiedades más relevantes que emplean las ecuaciones de fluidización es la densidad de partícula (también llamada densidad aparente), definida como la masa de la partícula dividida por su volumen hidrodinámico (volumen que el fluido “ve” en su interacción fluidodinámica con la partícula y que incluye el volumen de todos los poros abiertos y cerrados). Esta propiedad difiere de la densidad absoluta que se define como la masa de la partícula dividida por el volumen de sólido que constituye la partícula (Rhodes, 1998).

En los sólidos no porosos, como es el caso de la arena, el volumen hidrodinámico se puede medir fácilmente con un picnómetro de agua y el valor de la densidad aparente coincide con el de la densidad absoluta. Sin embargo, el aserrín es un sólido altamente poroso y, por esa razón, se debe realizar la determinación de ambas densidades. Para calcular la densidad absoluta, se utilizó un picnómetro de helio; para el cálculo de la densidad de partícula se trabajó con un picnómetro de mercurio. En la Tabla 4.3 detallan las propiedades de los materiales más relevantes para este estudio, junto con su clasificación de Geldart (1973), que fue determinada con la ayuda de la Figura 2.4.

Tabla 4.3- Propiedades de los materiales.

| Material | d_p Sauter [μm] | $\rho_{\text{partícula}}$ [g/cm^3] | ρ_{absoluta} [g/cm^3] | Geldart |
|----------|--------------------------------|--|---|---------|
| Biomasa | 700 | 402 | 1406 | B |
| Arena | 512,5 | 2650 | 2650 | B |

4.2.3 – DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo experimental consiste en una columna de acrílico de 5 mm de espesor, 109.3 mm de diámetro interno y una altura total de 900 mm. El distribuidor es un plato de acrílico, perforado con orificios de 1mm de diámetro. El lecho cuenta con sensores de presión diferencial, de caudal (anemómetro de hilo caliente), temperatura y un sensor de ultrasonido para registrar la expansión (altura alcanzada) del material fluidizado; todos ellos conectados a un sistema de adquisición de datos. El aire, tomado en condiciones ambientales, es impulsado a través del lecho por un compresor centrífugo. La línea de descarga del compresor se divide en dos, una rama que conduce el aire al lecho y que está restringida con una válvula que permite la regulación del caudal durante las experiencias y un venteo que se dirige al exterior. La Figura 4.1 muestra un esquema de la instalación.

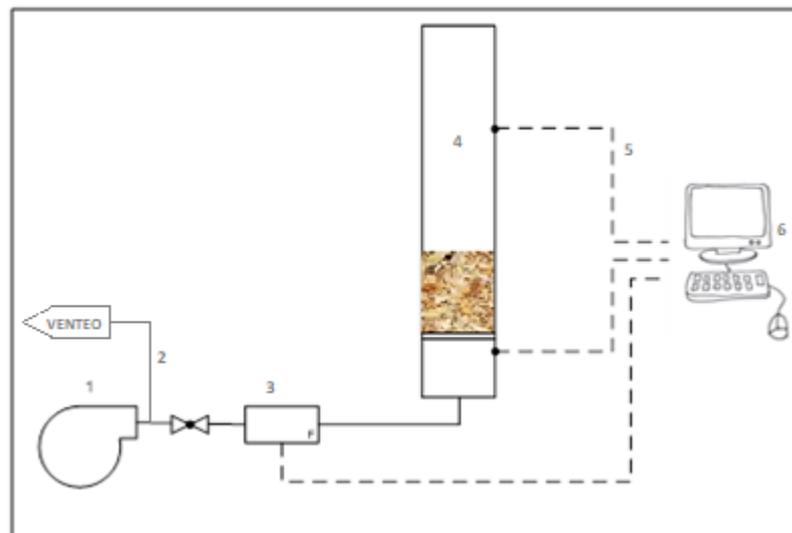


Figura 4.1 - Instalación experimental: (1) compresor; (2) línea de venteo; (3) anemómetro de hilo caliente; (4) columna de lecho fluidizado;(5) medidor de presión diferencial;(6) sistema de adquisición de datos.

4.2.4 – PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron fluidizando arena, biomasa y mezclas binarias de arena-biomasa en distintas proporciones. Las determinaciones experimentales de la velocidad de mínima fluidización se realizaron a presión y temperatura ambiente (1 atmósfera de presión y 20°C de temperatura).

Se partió de una altura de lecho en reposo de aproximadamente 150 mm, se registró tanto la curva de fluidización como la de desfluidización y todas las experiencias se realizaron por triplicado.

En todos los casos, antes de comenzar las mediciones, se fluidizó el lecho con el objetivo de mezclar los sólidos y luego se lo desfluidizó lentamente. A partir de la mezcla así lograda, se realizaron las experiencias.

Durante las experiencias, la válvula de ingreso de aire al lecho se abrió (o cerró en el caso de estar en la etapa de desfluidización) lentamente de forma manual por cada medición realizada. Una vez estabilizado el caudal de aire, se tomaba registro del caudal (equivalente a la velocidad superficial dado que el diámetro interno del lecho es constante) y de la pérdida de carga (ΔP) a través del lecho.

A cada lectura de ΔP debió restársele la caída de presión a través de distribuidor, ya que el sensor de presión diferencial inferior se encuentra debajo del mismo. De esta forma, el valor de ΔP considerado es, exclusivamente, debido al relleno de partículas cargadas en el lecho.

La U_{mf} se evaluó gráficamente a partir de la intersección de las líneas de ajuste de ΔP vs. velocidad superficial del gas (U_s) de ambas regiones, lecho en reposo y lecho fluidizado. Para trazar la recta de esta última región se utilizaron los valores obtenidos en la desfluidización (Dhodapkar y col., 2012; Kunii y Levenspiel, 1991).

Se realizaron cinco experiencias de fluidización, con las composiciones volumétricas de arena y biomasa mostradas en la Tabla 4.4. Tres de las experiencias fueron de sistemas binarios con diferentes composiciones y, las dos restantes, correspondieron a lechos de partículas de arena y biomasa. En la Tabla 4.4 se detallan, además, las composiciones máscas de los sistemas estudiados.

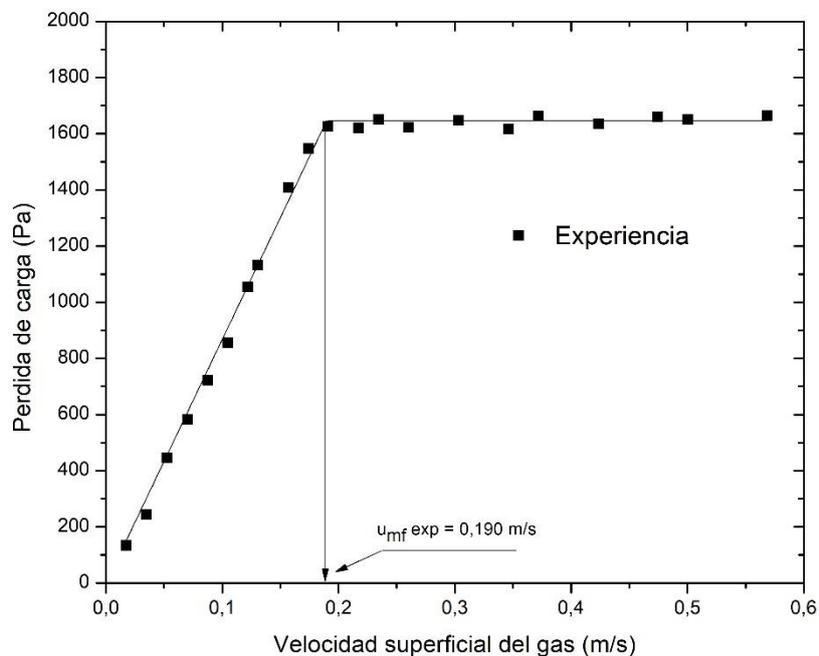
Tabla 4.4 - Composición de las mezclas arena y biomasa fluidizadas.

| % V/V | Arena 100% | Arena 40% | Arena 30% | Arena 15% | Biomasa 100% |
|----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Masa de arena [gr] | 1757,44 | 965,13 | 770,70 | 324,99 | 0,00 |
| Masa de biomasa [gr] | 0,00 | 116,25 | 122,56 | 131,65 | 179,41 |
| Masa total [gr] | 1757,44 | 1081,38 | 893,26 | 456,64 | 179,41 |
| % P/P | 100% | 89% | 86% | 71% | 0% |

4.3 – SECCIÓN II: RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.3.1 – LECHO DE PARTÍCULAS DE ARENA

En la [Figura 4.2](#) se muestran los valores de pérdida de carga a través del lecho en función de la velocidad superficial del gas, obtenidos experimentalmente. Se observa que la pérdida de carga aumenta linealmente con el incremento de velocidad del gas durante la etapa de lecho fijo. Al continuar aumentando la velocidad, se llega a un punto donde la caída de presión se mantiene prácticamente constante, situación que coincide con el movimiento de las partículas en el lecho, dando lugar al régimen fluidizado.



[Figura 4.2](#) - Pérdida de carga vs velocidad superficial del aire para el lecho de arena pura.

Durante el régimen fluidizado, aumentos en la velocidad del aire a través del lecho generan cada vez mayor agitación de las partículas, expansión del lecho y formación de bolsones o burbujas de aire ascendentes que producen circulación de las partículas. Se observó claramente como estos bolsones arrastraban partículas de arena desde el fondo hacia el tope del lecho. Se pudo apreciar como el lecho presentó dos regiones durante el régimen fluidizado, una región más densa en el fondo y una claramente con menor fracción volumétrica de sólidos en la parte superior del lecho llamada *freeboard* ([Kunii y Levenspiel, 1991](#)). Al llegar las burbujas al *freeboard* y romperse, las partículas caían sobre el lecho en forma de lluvia. Estos fenómenos pueden verse en la [Figura 4.3](#).

Durante la experiencia, la velocidad superficial del aire se incrementó hasta 0,56 m/s, valor en la cual se detectó elutriación. En este punto se inició una disminución gradual de U_s , hasta alcanzar nuevamente el estado de lecho fijo. Las curvas de fluidización y desfluidización obtenidas fueron coincidentes, sin presencia de la histéresis típica de estos sistemas (Zhang y col., 2011). Este comportamiento es atribuido a la fluidización previa de las partículas antes de comenzar con las experiencias que disminuyó la compactación del lecho.



Figura 4.3 - Burbuja en el tope del lecho de arena durante la fluidización.

4.3.2 – LECHO DE PARTÍCULAS DE BIOMASA

En la Figura 4.4 se muestran los resultados de pérdida de carga en función de la velocidad superficial del gas para biomasa pura. Como puede verse, su comportamiento difiere del observado en el sistema compuesto por arena. A velocidades bajas, el lecho se mantiene en reposo y la caída de presión aumenta linealmente con la velocidad del gas, pero, a partir de la velocidad de 0,12 m/s, comienzan a producirse pequeñas canalizaciones tanto en el centro del lecho como sobre las paredes del tubo. Al continuar aumentando U_s , las canalizaciones se incrementan en número y tamaño. A 0,174 m/s se observa el máximo valor de pérdida de carga y, con un aumento posterior de velocidad, se produce un reacomodamiento de las partículas, que va acompañado por una ligera disminución en la pérdida de carga. Las partículas de la zona superior del lecho se fluidizan, mientras que las de la zona inferior se mantienen estáticas. Este comportamiento, propio de sistemas segregados, se atribuye a la distribución de tamaños de la muestra de biomasa. La segregación ocurre en sistemas cuyas partículas presentan

diferentes densidades y/o diferentes tamaños. Las partículas de mayor densidad tienden a hundirse en el lecho, mientras que las de menor densidad tienden a flotar. En los sistemas donde no existe diferencia de densidades, las partículas de mayor tamaño son las que tiende a permanecer en el fondo (Chiba y col., 1979). Al continuar aumentando U_s , fue cada vez mayor la cantidad de partículas con movimiento dentro del lecho y, a la velocidad de 0,314 m/s, la totalidad de las partículas estarán fluidizadas.

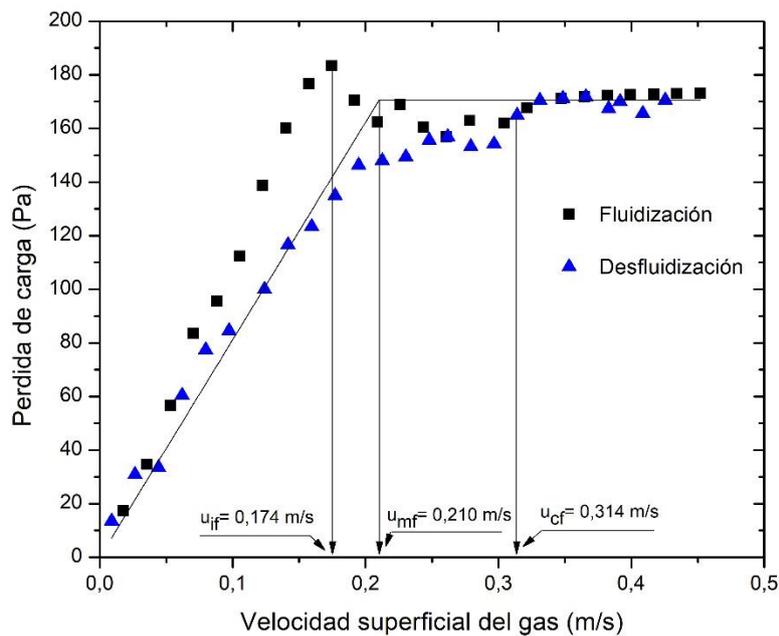


Figura 4.4 - Pérdida de carga vs velocidad superficial del aire para el lecho de biomasa pura.

Puede observarse que el lecho pasa por dos regímenes de fluidización diferentes, similares a los observados por Zhang y col. (2011). El primero de los regímenes de fluidización está comprendido entre la *velocidad de fluidización incipiente* (U_{if}) y la *velocidad de fluidización completa* (U_{cf}). Antes de la U_{if} , el lecho tiene un comportamiento de lecho fijo, con la aparición de algunas canalizaciones o cortocircuitos pequeños de gas. A partir de la U_{if} , la fluidización toma lugar en el tope del lecho, abarcando una porción cada vez mayor a medida que se aumenta la velocidad del aire. En la Figura 4.5 puede observarse el aspecto del lecho durante esta etapa, con canalizaciones, movimiento en la parte superior del lecho y partículas en reposo en el fondo. Durante este intervalo, la pérdida de carga es irregular, oscilando entre 170 y 146 Pa. Al alcanzar U_{cf} ,

comienza el segundo régimen de fluidización, se fluidiza completamente el lecho y la pérdida de carga se mantiene prácticamente constante al aumentar la velocidad del aire.



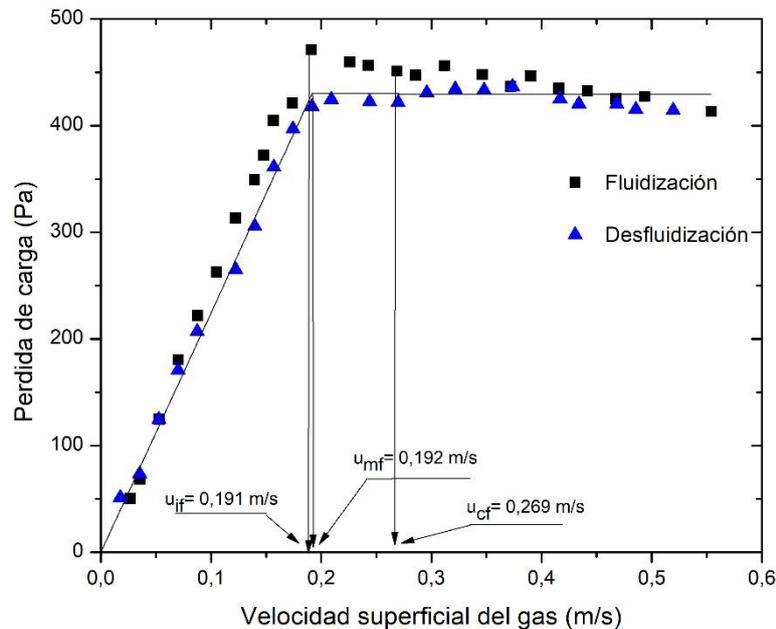
Figura 4.5- Biomasa durante el régimen de fluidización comprendido entre U_{if} y U_{cf} .

Al desfluidizar el lecho, disminuyendo gradualmente la velocidad de aire, se observa el fenómeno de histéresis, con valores de pérdida de carga inferiores a los registrados durante la fluidización. Esto se le atribuye al hecho de que, si bien se fluidizó el lecho antes de comenzar con la experiencia, se efectuó una desfluidización lenta, lo que permitió que las partículas más grandes se depositen o segreguen en el fondo del lecho, disminuyendo así la porosidad del lecho. También cabe aclarar que este fenómeno ocurre en el lecho con biomasa y no en el de arena, porque la biomasa presenta una distribución de tamaños mayor, con partículas que pueden tener más del doble de tamaño que otras, por ser una muestra proveniente del retenido en dos mallas de tamizado. El diámetro de las partículas varía entre 0,425 y 1,18 mm (Tabla 4.2). En cambio, los posibles de tamaños de las partículas de arena están comprendidos entre 0,425 y 0,60 mm.

El valor de la U_{mf} de 0,21 m/s observado experimentalmente se encuentra comprendido entre $U_{if} = 0,174$ y $U_{cf} = 0,314$ (Figura 4.4).

4.3.3 – MEZCLAS BINARIAS ARENA-BIOMASA

En las, [Figura 4.6](#), [Figura 4.7](#) y [Figura 4.8](#) se representan los perfiles de pérdida de carga vs. velocidad superficial de aire de los 3 sistemas binarios arena-biomasa estudiados, con 15%, 30% y 40% V/V de arena respectivamente.



[Figura 4.6](#) - Pérdida de carga vs velocidad superficial del aire para el lecho del sistema arena-biomasa con 15% V/V de arena.

Para las tres mezclas se obtienen resultados similares a los obtenidos por [Zhang y col. \(2011\)](#). Al ir aumentando gradualmente la velocidad del gas durante la etapa de lecho fijo se llega a un máximo de pérdida de carga, valor que permite identificar la U_{if} . Al seguir aumentando la velocidad del gas se llega a la U_{cf} , punto en el cual se tiene un régimen completamente fluidizado, identificado visualmente como la mínima velocidad a la cual se mueven todas las partículas del lecho. Además, es el punto a partir del cual la caída de presión se mantiene constante con sucesivos aumentos de velocidad.

En el intervalo comprendido entre las velocidades U_{if} y U_{cf} la fluidización es parcial y, a diferencia de lo que sucedió en la experiencia con biomasa, esta fluidización fue observada en el fondo del lecho, debido a la levemente inferior U_{mf} de la arena y al fenómeno de segregación producto de la diferencia de densidades de los componentes del sistema binario en estudio (Tabla 4.2).

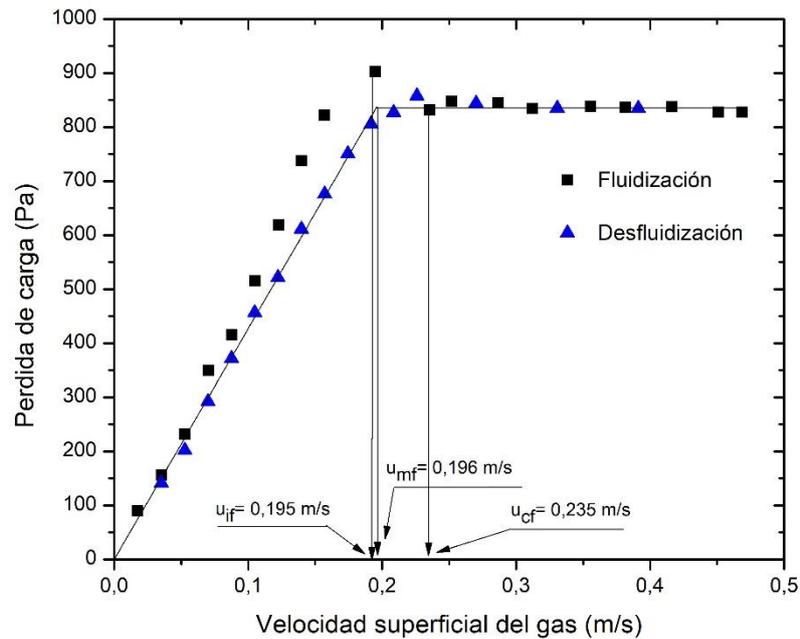


Figura 4.7 - Pérdida de carga vs velocidad superficial del aire para el lecho del sistema arena-biomasa con 30% V/V de arena.

En cuanto al fenómeno de histéresis, se observa que este efecto se va atenuando a medida que se incrementa la fracción arena, mostrando los sistemas una tendencia a comportarse como la arena pura, a medida que se aumenta la proporción de la misma.

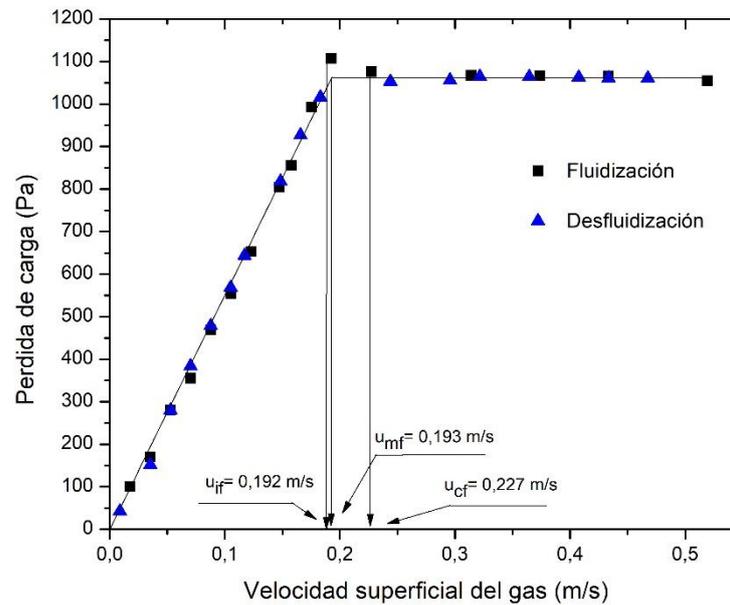


Figura 4.8 - Pérdida de carga vs velocidad superficial del aire para el lecho del sistema arena-biomasa con 40% V/V de arena.

El valor de U_{mf} obtenido gráficamente en los tres sistemas de mezclas, se encuentra siempre comprendido entre las U_{if} y U_{cf} correspondientes.

4.3.4 – COMPARACIÓN DE LAS EXPERIENCIAS REALIZADAS

En la Figura 4.9 se representan las curvas de fluidización (F) y desfluidización (DF) obtenidas para los 3 sistemas binarios arena-biomasa estudiados, junto con los resultados correspondientes a los sólidos puros.

Puede observarse en las mezclas binarias, que, al aumentar la fracción volumétrica de arena, aumenta la pendiente de la línea de tendencia ΔP vs. U_s correspondiente a la zona de lecho en reposo y se incrementa el valor de la pérdida de carga promedio de la zona de lecho fluidizado.

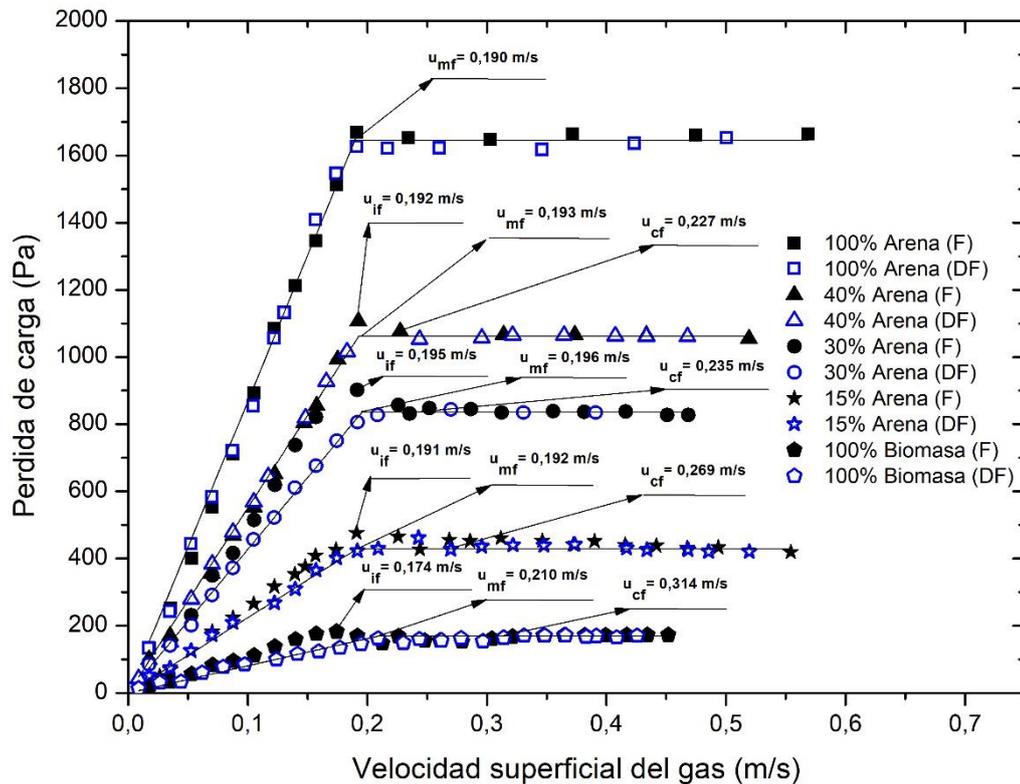


Figura 4.9 - Resumen de resultados ΔP vs. U_s para distintas mezclas arena-biomasa (expresadas en V/V %). Para cada mezcla se indican las velocidades características sobre la curva.

El cambio observado en la U_{mf} de las mezclas, con respecto a la biomasa pura, es mínimo debido a que la U_{mf} de ambos sólidos puros es muy cercana. Sin embargo, es importante destacar la mejora observada en la calidad de la fluidización de la biomasa incorporando una pequeña proporción de arena. El agregado de arena permite reducir las fuerzas de cohesión y enlace presentes entre las partículas de biomasa, disminuyendo la formación de canales preferenciales y, por lo tanto, favoreciendo la fluidización.

En la [Tabla 4.5](#) se resumen los resultados experimentales de los cinco ensayos realizados. Se observa que para el lecho de arena no se distinguen las dos velocidades características U_{if} y U_{cf} , sino que puede decirse que en este sistema $U_{if}=U_{mf}=U_{cf}$.

Tanto para las mezclas, como para el lecho de biomasa, se observan las dos velocidades que caracterizan los cambios de regímenes dentro del lecho, con la particularidad de que, al aumentar la fracción de arena, disminuye la U_{cf} , tendiendo paulatinamente al comportamiento del lecho de arena pura. También se observa una disminución de la diferencia $U_{cf}-U_{if}$.

Tabla 4.5 - Velocidades características de las mezclas y materiales puros fluidizados.

| % V/V | 100% Arena | 40% Arena | 30% Arena | 15% Arena | 100% Biomasa |
|---|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| U_{if} [m/s] | 0.190 | 0.192 | 0.195 | 0.191 | 0.174 |
| U_{mf} [m/s] | 0.190 | 0.193 | 0.196 | 0.192 | 0.210 |
| U_{cf} [m/s] | 0.190 | 0.227 | 0.235 | 0.269 | 0.314 |
| $(U_{cf}-U_{if})$ [m/s] | 0.0 | 0.035 | 0.040 | 0.078 | 0.140 |

CAPÍTULO V**SIMULACIÓN POR CFD DE LECHOS FLUIDIZADOS DE SISTEMAS
BINARIOS ARENA-BIOMASA**

| | |
|---|------|
| 5.1 - Introducción..... | 5.3 |
| 5.2 – Geometría y mallado..... | 5.3 |
| 5.3 – Condiciones de contorno | 5.7 |
| 5.4 – Modelos de simulación | 5.9 |
| 5.4.1 – Modelo para la simulación de lecho fijo | 5.9 |
| 5.4.2 – Modelo para la simulación de lecho fluidizado | 5.12 |

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN POR CFD DE LECHOS FLUIDIZADOS DE SISTEMAS BINARIOS ARENA-BIOMASA

5.1 - INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirá la metodología desarrollada para realizar las simulaciones por CFD, diferenciando la simulación de la etapa de lecho fijo de la correspondiente al lecho fluidizado e indicando los modelos y criterios empleados. Se incluye, en cada caso, el proceso de generación y validación de las mallas empleadas en las simulaciones.

Las simulaciones se llevaron a cabo para condiciones coincidentes con las fijadas en los ensayos experimentales.

El procedimiento de simulación comienza con la construcción de la geometría, el mallado y su validación. Luego deben elegirse los modelos a utilizarse para realizar las simulaciones, tanto para lecho fijo como para lecho fluidizado. Finalmente, se realizan las simulaciones para lecho fijo y fluidizado, para los cinco sistemas ensayados, arena pura, biomasa pura y tres mezclas con diferentes proporciones de ellos.

5.2 – GEOMETRÍA Y MALLADO

La construcción de la geometría que delimita el dominio del problema y el mallado fue realizado con el *software* ANSYS-Fluent 18.2 partiendo del ambiente de trabajo *Workbench* e iniciando un Sistema de Análisis con la opción *Fluid Flow (FLUENT)*, tal como se indicó en el [Capítulo III](#).

Para la simulación del lecho fluidizado, teniendo en cuenta la información experimental, se tomó la decisión de desarrollar una geometría rectangular en dos dimensiones, de base 0.1093 m y 0.70 m de altura, optándose por disminuir la altura real del tubo (0,90 m) con el objeto de reducir el tiempo de cómputo, dado que en la parte superior del lecho solo circula aire y la pérdida de carga es despreciable (dada principalmente por la fricción del aire con las paredes del recipiente). En la [Figura 5.1](#) se muestra la geometría adoptada para la simulación del lecho fluidizado.

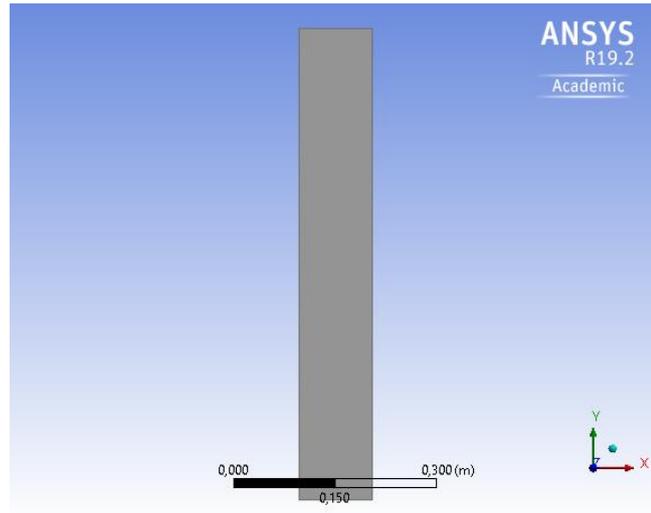


Figura 5.1 - Geometría utilizada para la simulación del lecho fluidizado.

Para el caso de la simulación del lecho fijo, la geometría fue acotada a la zona que contenía el relleno sólido en reposo, por lo tanto, se construyeron rectángulos en dos dimensiones de 0.1093 m de base y de alturas iguales a la altura del relleno correspondiente a cada sistema en la experiencia. La Figura 5.2 muestra la geometría para la simulación del lecho en reposo de arena.

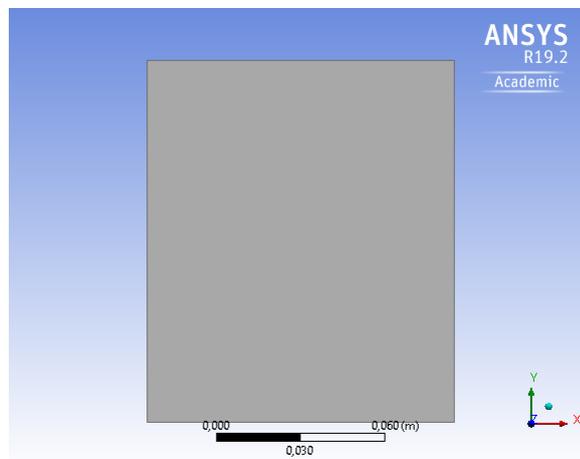


Figura 5.2 - Geometría para la simulación del lecho fijo de arena.

Una vez dibujada la geometría, se realizó el mallado. Con el fin de asegurar que los resultados de las simulaciones sean independientes de la malla adoptada, se llevó a cabo el proceso de validación de la misma.

El método estándar de comprobación de la independencia de la malla consiste en incrementar la resolución y repetir la simulación. Si los resultados no cambian de manera

considerable es probable que la malla original sea adecuada. Si, por el contrario, surgen diferencias importantes entre las dos soluciones, la malla original es considerada una resolución inadecuada.

Para llevar adelante dicho proceso, en primer lugar, se eligió la geometría del mallado, optándose por cuadriláteros regulares en todos los casos. A continuación, se les asignaron las dimensiones a dichos cuadriláteros regulares. Las verificaciones para los casos de simulación del lecho fluidizado y lecho en reposo se realizaron para el sistema compuesto 100% por arena, obteniéndose las siguientes mallas:

- Malla 1 para lecho fluidizado con cuadriláteros de 0.001 m x 0.001 m, obteniendo un total de 76300 elementos. Malla 1 para lecho fijo con cuadriláteros de 0.001 m x 0.001 m, obteniendo un total de 14170 elementos.
- Malla 2 para lecho fluidizado con cuadriláteros de 0.002 m x 0.002 m, obteniendo un total de 19250 elementos. Malla 2 para lecho fijo con cuadriláteros de 0.002 m x 0.002 m, obteniendo un total de 3575 elementos.
- Malla 3 para lecho fluidizado con cuadriláteros de 0.003 m x 0.003 m, obteniendo un total de 8388 elementos. Malla 2 para lecho fijo con cuadriláteros de 0.003 m x 0.003 m, obteniendo un total de 1558 elementos.

Se efectuaron las simulaciones con las tres mallas, y se analizaron las variables ΔP promedio en el lecho, tiempo de cómputo para 12 segundos de simulación y nitidez en las imágenes de fracción de sólidos generadas por el *software* (estas dos últimas sólo para el caso de lecho fluidizado).

A modo de ejemplo se presentan los resultados de las verificaciones para el caso de lecho fluidizado en la [Tabla 5.1](#). Se simuló con una velocidad de 0,30 m/s siendo este un valor intermedio entre la U_{mf} obtenida experimentalmente, y la velocidad de aire a la cual se comenzó a observar elutriación. Para el cálculo del ΔP promedio se consideraron los datos a partir del tercer segundo de la simulación, descartando los primeros tres, con el objetivo de eliminar efectos iniciales inherentes a la simulación en estado transiente.

En relación al ΔP en el lecho, las diferencias relativas son del 0,13% y 0,31% para las Mallas 2 y 3 respectivamente, con respecto a la Malla 1 de mayor cantidad de elementos ([Tabla 5.1](#)). La [Figura 5.3](#) permite observar que la calidad y el detalle de las imágenes decrece, a medida que disminuye la cantidad de elementos de la Malla. En cuanto al tiempo de cómputo, para resolver la simulación de 12seg de fluidización, para

la Malla 1 se requirieron 24 hs, mientras que para las Mallas 2 y 3 se demoró 15 y 12 hs respectivamente. Se optó por utilizar la Malla 2, que reproduce el ΔP con una diferencia mínima respecto a la Malla 1, con una buena calidad de imágenes de la fracción de sólidos y en un tiempo de computo 37% menor al de la Malla 1.

Tabla 5.1 - Resultados de las simulaciones del lecho fluidizado de arena, con mallas 1, 2 y 3 (para $U_s=0.30$ m/s)

| Malla | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|---------|---------|---------|
| Cantidad de celdas | 76300 | 19250 | 8388 |
| ΔP Promedio [Pa] | 1804.30 | 1806.63 | 1798.70 |
| Tiempo de computo [hs] | 24 | 15 | 12 |

Un procedimiento análogo fue utilizado para validar la malla del lecho fijo, adoptándose finalmente la Malla 2 que posee 3575 elementos. Las Figuras 5.4 y 5.5 muestran las mallas utilizadas para lecho fluidizado y lecho fijo respectivamente.

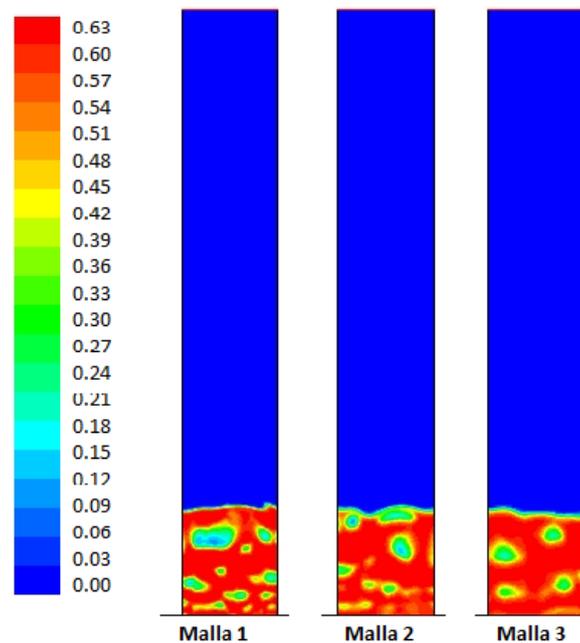


Figura 5.3 - Fracción volumétrica de sólido (arena) a los 4.5 s de simulación de lecho con $U_s = 0,30$ m/s para las Mallas 1, 2 y 3.

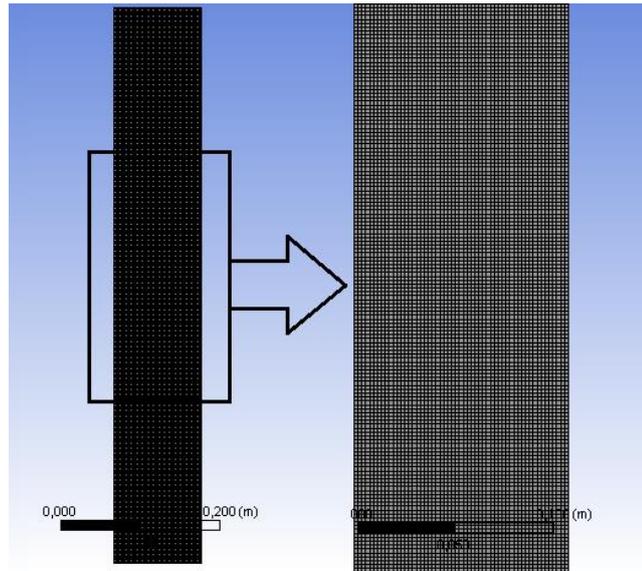


Figura 5.4 - Malla 2, seleccionada para la simulación del lecho fluidizado.

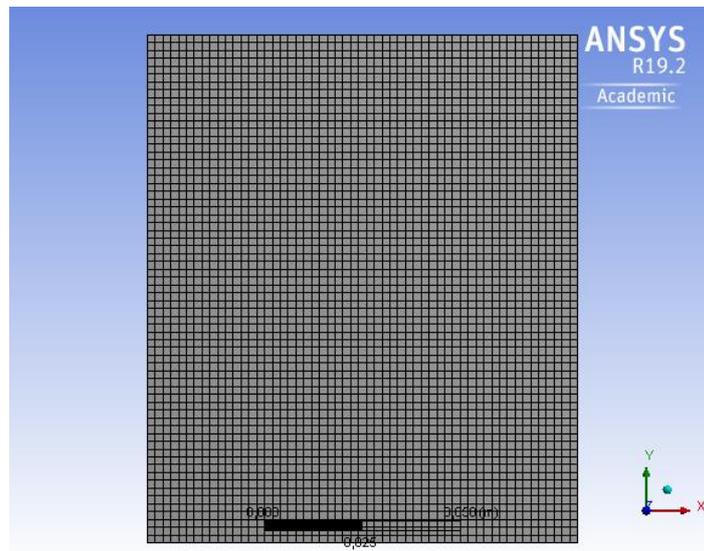


Figura 5.5 - Malla 2, seleccionada para la simulación del lecho fijo.

5.3 – CONDICIONES DE CONTORNO

Luego de construir la geometría y efectuar el mallado, se seleccionaron las condiciones de contorno de los casos a simular (Figuras 5.6 y 5.7).

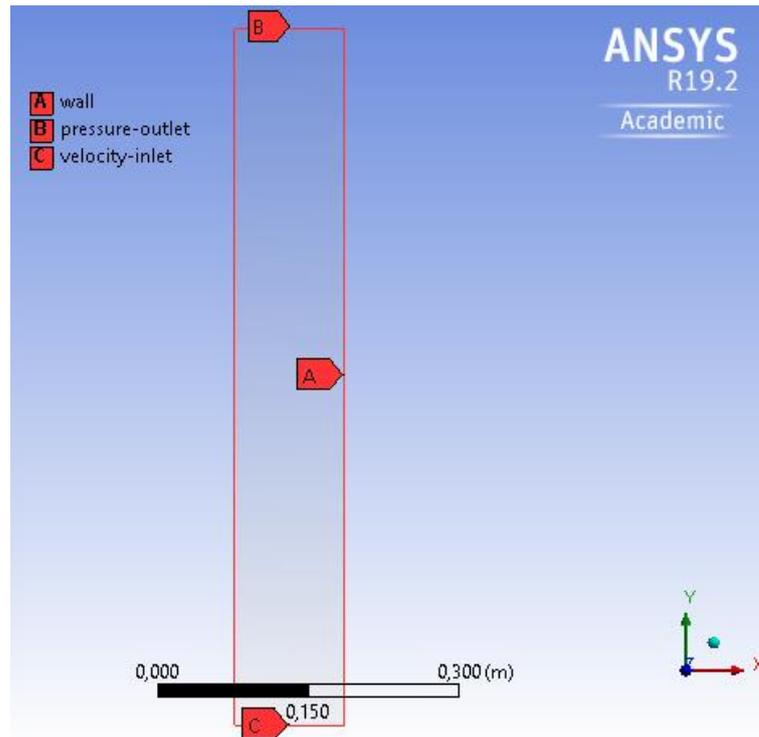


Figura 5.6 -Imagen de condiciones de contorno para lecho fluidizado.

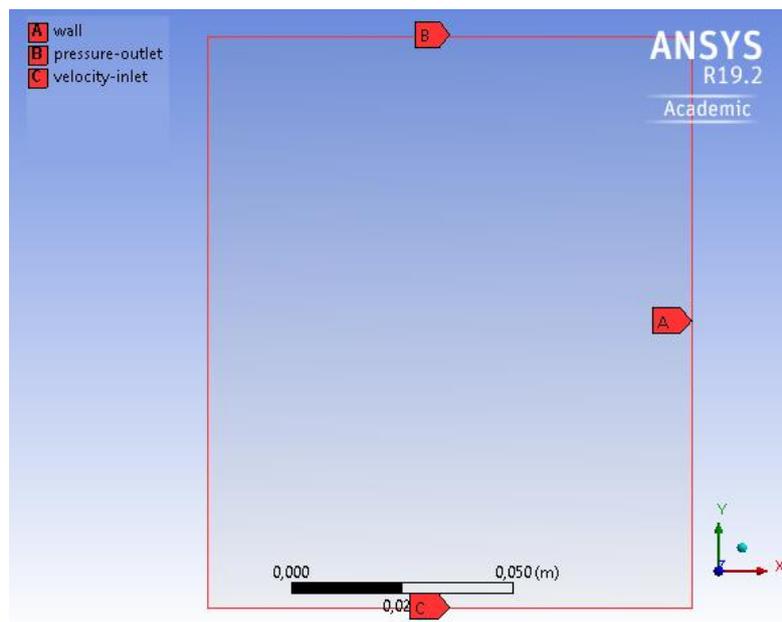


Figura 5.7 - Imagen de condiciones de contorno para lecho fijo.

Las condiciones de contorno aplicadas en las simulaciones (indicadas con las etiquetas A, B y C de las Figuras 5.6 y 5.7) son las siguientes:

- **Etiqueta A:** *Wall*. En la pared del lecho, se estableció la condición de pared estacionaria (*Stationary Wall*) y de no deslizamiento (*No Slip*) para todos los materiales definidos dentro del lecho.

- **Etiqueta B:** *Pressure Outlet*. En la salida, se estableció la condición de presión de salida con una presión manométrica de 0 Pa para todos los materiales definidos dentro del lecho (aire, arena y biomasa).
- **Etiqueta C:** *Velocity Inlet*. En la superficie de entrada de gas al lecho, se estableció la condición entrada de velocidad definiendo una velocidad superficial uniforme de la fase gas.

5.4 – MODELOS DE SIMULACIÓN

En este apartado se comentarán los modelos y parámetros elegidos para llevar adelante las simulaciones de lecho fijo y de lecho fluidizado. Se desarrollarán con más profundidad y con aplicación directa al caso de estudio, algunos aspectos generales tratados en el [Capítulo III](#).

5.4.1 – MODELO PARA LA SIMULACIÓN DEL LECHO FIJO

A bajas velocidades del aire el lecho permanece en reposo. Para simular esta condición operativa se adoptó el modelo de medio poroso, descrito en el [Capítulo III](#), en el cual el dominio se define como un medio poroso a través del cual fluye el aire. Se empleó el esquema de resolución SIMPLE para resolver la ecuación de presión y velocidad, la discretización espacial se realizó con el esquema *Second Order* para la presión y *Second Order Upwind* para el momento. Se inicializó la solución con los datos de entrada de la corriente de aire.

Los principales parámetros introducidos en el *software* para llevar a cabo las simulaciones de los sistemas puros y mezclas, se detallan en la [Tabla 5.2](#). El procedimiento para cada sistema consistió en simular, en estado estacionario, la caída de presión obtenida, al hacer pasar a través del medio poroso, aire a diferentes velocidades.

Tabla 5.2 - Parámetros utilizados en la simulación numérica del lecho fijo.

| Parámetro | Valor |
|---|---------------------------------|
| Densidad del aire | 1,225 Kg m ⁻³ |
| Viscosidad del aire | 1,7894 10 ⁻⁵ Pa s |
| Porosidad (ϵ) del Medio Poroso Arena | 0,46 |
| Porosidad (ϵ) del Medio Poroso Biomasa | 0.72 |
| Velocidad superficial del gas | [0,03 – 0,18] m s ⁻¹ |
| Altura inicial del lecho | [0,13 – 0,17] m |
| Cantidad de Iteraciones | 200 |
| Criterio de Convergencia | 10 ⁻³ |

La porosidad de los medios porosos de la [Tabla 5.2](#) fue calculada con la ecuación (5.1) a partir del volumen total ocupado por el lecho en reposo (altura del lecho de partículas multiplicada por la sección del tubo) y del volumen real de las partículas, calculado a partir del peso de las partículas cargadas ([Tabla 4.3](#)) y su densidad ([Tabla 4.2](#)).

$$\epsilon = 1 - \frac{V_{real}}{V_{total}} \quad (5.1)$$

Para obtener los valores de pérdida de carga a través del lecho en reposo, es necesario ingresar en el *software* los coeficientes de permeabilidad (α), y el factor de resistencia inercial (C_2) que se definen en el modelo de medio poroso en el [Capítulo III](#) en la ecuación (3.5). Un ajuste correcto de los mismos es la clave para una buena simulación del comportamiento del lecho fijo.

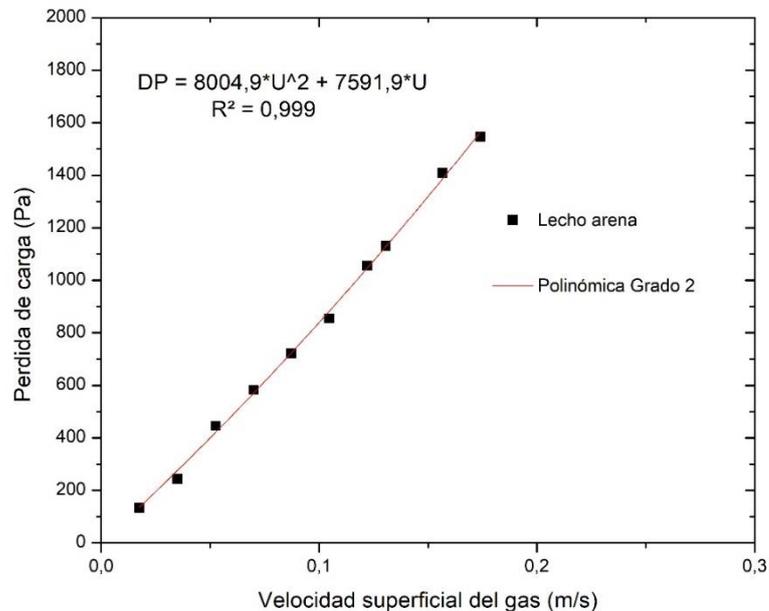
En este trabajo, la estimación de los coeficientes α y C_2 , se realizó a partir de los datos experimentales de ΔP del lecho vs. U_s , efectuando un ajuste de los mismos mediante una función polinómica de segundo grado. Dicho procedimiento es el sugerido por el [ANSYS-Fluent User's Guide, Fluent Inc. \(2017\)](#) en el caso de contar con los datos experimentales antes mencionados. El procedimiento seguido se detalla a continuación:

- En primer lugar, partiendo de los datos experimentales de ΔP del lecho vs. U_s de agente fluidizante durante la etapa de lecho fijo, se realizaron los ajustes con polinomios de segundo grado cuya fórmula general es:

$$\Delta P = A U^2 + B U \quad (5.2)$$

Se utilizaron los datos correspondientes de desfluidización, según lo recomendado por [Kunii y Levenspiel, 1991](#) y [Dhodapkar y col., 2012](#).

A y B son los valores numéricos que surgen del ajuste. Los resultados para el lecho con arena se muestran en la [Figura 5.8](#).



[Figura 5.8](#) - Ajuste con polinomio de grado dos para la desfluidización del lecho fijo de arena. Se incluye en la figura el resultado del ajuste (5.2) para este caso.

➤ En segundo lugar, se calcularon α y C_2 mediante las siguientes ecuaciones ([ANSYS-Fluent User's Guide, Fluent Inc., 2017](#)):

$$C_2 = \frac{2A}{\rho L} \quad (5.3)$$

$$\alpha = \frac{\mu L}{B} \quad (5.4)$$

Donde, L es la altura del lecho fijo y ρ y μ , son la densidad y viscosidad del aire respectivamente.

De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados para α y C_2 :

➤ **Lecho fijo Arena:** $1/\alpha = 3,26 \times 10^9 \text{ m}^{-2}$; $C_2 = 100532,50 \text{ m}^{-1}$.

(Se informa $1/\alpha$, dado que es el dato que requiere Fluent)

El *software* también toma como parámetro de entrada la porosidad del medio, que para el caso de arena es de 0,46 ([Tabla 5.2](#)).

Se siguió el mismo procedimiento para obtener los parámetros de las partículas de biomasa y para los tres sistemas binarios estudiados, obteniéndose los valores:

$$\Rightarrow \text{Lecho fijo Biomasa: } 1/\alpha = 2,38 \times 10^8 \text{ m}^{-2}; \quad C_2 = 6579,21 \text{ m}^{-1}.$$

La porosidad del medio para el lecho de Biomasa fue de 0,72 (Tabla 5.2).

$$\Rightarrow \text{Lecho fijo 15% Arena: } 1/\alpha = 7,66 \times 10^8 \text{ m}^{-2}; \quad C_2 = 12347,21 \text{ m}^{-1}.$$

Porosidad del medio: 0,68.

$$\Rightarrow \text{Lecho fijo 30% Arena: } 1/\alpha = 1,39 \times 10^9 \text{ m}^{-2}; \quad C_2 = 19633,31 \text{ m}^{-1}.$$

Porosidad del medio: 0,64.

$$\Rightarrow \text{Lecho fijo 40% Arena: } 1/\alpha = 1,79 \times 10^9 \text{ m}^{-2}; \quad C_2 = 27333,97 \text{ m}^{-1}.$$

Porosidad del medio: 0,62.

Los valores de porosidad del medio para los sistemas de mezclas se calcularon con una ponderación volumétrica de los valores de porosidad de cada uno de los sistemas puros. Se ejemplifica el cálculo para el caso de lecho fijo con 15% de Arena:

$$\epsilon_{15\% \text{ Arena}} = 0.15 \epsilon_{\text{Arena}} + 0.85 \epsilon_{\text{Biomasa}} = 0,68$$

5.4.2 – MODELO PARA LA SIMULACIÓN DEL LECHO FLUIDIZADO

El caso particular del comportamiento fluidodinámico de un lecho fluidizado entra dentro de los problemas de flujo multifásico. Para la simulación de sistemas de flujo multifásico, ANSYS-Fluent 18.2 posee dos tipos de enfoques: Euler-Lagrange y Euler-Euler. De acuerdo al manual [ANSYS-Fluent User's Guide, Fluent Inc. \(2017\)](#), uno de los parámetros de importancia para poder definir el tipo de enfoque a utilizar es la fracción volumétrica de la fase “dispersa” (sólido) frente a la fase “fluida” (aire). Si esta fracción de volumen es alta (mayor a un 10%) como ocurre en el caso de un lecho fluidizado, entonces se utiliza el enfoque Euler-Euler. Una vez seleccionado el enfoque Euler-Euler se dispone de tres modelos, que difieren en la forma en que son consideradas las interacciones entre fases y los acoplos entre las ecuaciones de fenómenos de transporte. De estos tres, mencionados en el [Capítulo III](#), el modelo Euleriano es el único recomendado para lechos fluidizados ya que engloba los casos de flujo multifásico con alta “carga de partículas”.

Por esta razón, se adoptó el modelo multifásico Euleriano, en el cual las dos fases (gas y sólido), son tratadas como continuas e interpenetrantes y pueden interactuar en cualquier punto del dominio. El campo de presión es compartido por las dos fases en proporción a su fracción volumétrica. El movimiento de cada fase está gobernado por las respectivas ecuaciones de conservación de masa y momento.

Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando los esquemas de discretización espacial *Second Order Upwind* para las ecuaciones de momento, *First Order Upwind* para la fracción volumétrica y el tiempo fue discretizado usando un esquema *Second Order Implicit*. Se empleó el esquema de resolución PC-SIMPLE para resolver la ecuación de presión y velocidad.

En la [Tabla 5.3](#) se resumen las propiedades, parámetros y modelos empleados en las simulaciones.

Tabla 5.3 - Parámetros utilizados en la simulación numérica del lecho fluidizado.

| Parámetro | Valor |
|--|---------------------------------|
| Densidad Arena | 2650 Kg m ⁻³ |
| Densidad Biomasa | 402 Kg m ⁻³ |
| Diámetro medio partículas de Arena | 0,0005125 m |
| Diámetro de Sauter partículas de Biomasa | 0,0007 m |
| Densidad del gas | 1,225 Kg m ⁻³ |
| Viscosidad del gas | 1,7894 10 ⁻⁵ Pa s |
| Coefficiente de restitución | 0,9 |
| Fracción de sólido inicial Arena | 0,54 |
| Fracción de sólido inicial Biomasa | 0,28 |
| Velocidad superficial del gas | [0.18 – 0.48] m s ⁻¹ |
| Altura inicial del lecho | [0,13-0.17] m |
| Tamaño de paso de tiempo | 0,001 s |
| Cantidad máxima de iteraciones | 20 |
| Criterio de convergencia | 10 ⁻³ |
| Modelo de arrastre | Gidaspow |

Uno de los parámetros de mayor importancia es el modelo de arrastre, ya que influye notablemente en los valores de la pérdida de carga, expansión del lecho y tamaño y forma de las burbujas. El modelo de arrastre escogido para representar la interacción entre el fluido y sólidos, como así también entre dos sólidos en el caso de las mezclas, es el modelo de Gidaspow. Esta selección se basó en recomendaciones que figuran en el

ANSYS-Fluent User's Guide, Fluent Inc. (2017), y en la experiencia desarrollada por el Grupo de Investigación de Reactores y Procesos Químicos y que fue volcada en el trabajo Reyes y col. (2010).

Otro parámetro importante a definir, es el tamaño del paso de tiempo a utilizar, ya que, si este es muy grande, puede ocasionar problemas de convergencia y dar resultados incorrectos, y si es muy pequeño, puede acarrear errores debido al truncado numérico y el tiempo de cómputo será excesivo. El tamaño de paso fue analizado, resultando el valor más adecuado de 0,001 segundos. Este valor es coincidente con el reportado en los trabajos de Taghipour y col. (2005), Hulme y col. (2005) y Azadi (2010). El criterio de convergencia seleccionado fue de 0,001 como recomienda Azadi (2010).

Para establecer la altura inicial del lecho en las simulaciones, se realizó un solo *patch* para el caso de los sistemas puros, con el cual se fijó la altura inicial ocupada por el material (arena o biomasa) y la fracción de sólidos del mismo. Para el caso de las mezclas se realizaron dos *patch* por simulación, el primero del material arena, al cual se le fijó altura, desde el fondo del tubo hasta la correspondiente al 15%, 30% o 40% de la altura total inicial de la mezcla según correspondiera, junto con su fracción de sólidos; y un segundo *patch* del material biomasa, fijándole altura y adjudicándole la porción superior restante para completar la altura inicial del sistema mezcla. También se establece la fracción de sólidos de la biomasa. Se decidió iniciar las simulaciones de los sistemas de mezclas con arena por debajo de la biomasa, debido a la mayor densidad de la primera y con la intención de reproducir el fenómeno de segregación observado en la experiencia. La fracción volumétrica de los sistemas puros se calcula con la ecuación (5.5), donde ε es el valor de porosidad informado en la Tabla 5.2.

$$V_f = 1 - \varepsilon \quad (5.5)$$

Debido a la naturaleza inestable de los lechos fluidizados burbujeantes, las propiedades del lecho son usualmente promediadas sobre un cierto periodo de tiempo para poder realizar un estudio de sus parámetros. En estudios experimentales, la longitud del periodo de tiempo promediado no es de gran importancia ya que se pueden realizar pruebas por periodos de tiempo prolongados. Por el contrario, la longitud del periodo de tiempo a promediar en las simulaciones numéricas es de gran importancia. En la situación actual de capacidad de cómputo de los modelos de CFD para flujos multifásicos, resulta inviable realizar simulaciones por más de algunos pocos segundos de tiempo. Por otro

lado, la precisión de los resultados será mayor al incrementar el periodo de tiempo simulado. Así, encontrar un valor óptimo del periodo de tiempo que equilibre el esfuerzo computacional y la precisión de los resultados es un aspecto crítico en la validación de los resultados numéricos. En este trabajo, las simulaciones se llevan a cabo durante 12 segundos, descartando los 3 primeros segundos, para evitar los efectos iniciales según lo recomendado por [Asegehegn y col. \(2011\)](#), quedando entonces un periodo de tiempo de 9 segundos para promediar los valores de las variables de estudio.

Durante las simulaciones se registraron los valores de presión en la entrada, en cada paso de tiempo. Estos valores fueron promediados para obtener la pérdida de carga promedio, correspondiente a cada valor de velocidad superficial del aire a la entrada del lecho.

Así, la curva de fluidización, para cada sistema ensayado, se compuso de los sucesivos puntos $\Delta P_{\text{promedio}}$ vs velocidad del aire. Cada uno de estos puntos corresponde a una simulación, con una única velocidad de aire a la entrada. Las velocidades superficiales del aire se variaron en un rango comprendido entre la U_{mf} experimental y el valor en el cual se observó elutriación, para cada uno de los sistemas.

CAPÍTULO VI**RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES POR CFD Y COMPARACIÓN
CON RESULTADOS EXPERIMENTALES**

| | |
|---|------|
| 6.1 - Introducción..... | 6.3 |
| 6.2 – Simulación del lecho de partículas de arena..... | 6.3 |
| 6.3 – Simulación del lecho de partículas de biomasa | 6.6 |
| 6.4 – Simulaciones de fluidización de mezclas arena-biomasa | 6.8 |
| 6.4.1 – Simulación mezcla arena-biomasa. Sistema 15% V/V de arena | 6.9 |
| 6.4.2 – Simulación mezcla arena-biomasa. Sistema 30% V/V de arena | 6.11 |
| 6.4.3 – Simulación mezcla arena-biomasa. Sistema 40% V/V de arena | 6.13 |
| 6.5 – Comparación de los resultados | 6.14 |

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES POR CFD Y COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 – INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de los parámetros característicos del comportamiento fluidodinámico del lecho, obtenidos a partir de las simulaciones. Se presentan los valores calculados de la pérdida de carga y velocidad de mínima fluidización para los cinco sistemas estudiados. Los parámetros mencionados son contrastados con los valores medidos experimentalmente, para determinar la validez de la aplicación de la técnica de CFD y de los modelos seleccionados en cada caso. Para cada uno de estos sistemas se muestran los resultados en forma de tablas comparativas, gráficos de pérdida de carga vs. velocidad del agente fluidizante e imágenes de fracción de volumen de sólidos en el lecho que permiten apreciar cualitativamente el estado de fluidización.

Las simulaciones se llevaron adelante con la versión 18.2 de ANSYS-Fluent, en una computadora con procesador Intel (R) Core (TM) i5-7200 CPU 2.7GHz y una memoria RAM de 4,00 GB.

6.2 – SIMULACIÓN DEL LECHO DE PARTÍCULAS DE ARENA

En la [Figura 6.1](#) se presentan los valores de pérdida de carga en todo el rango de velocidades simulado para la arena pura. Se presenta en un mismo gráfico el estado de lecho en reposo, el de lecho fluidizado, y, además, los valores experimentales. Los valores obtenidos de las simulaciones reproducen el comportamiento experimental del lecho en todo el rango de velocidades estudiado.

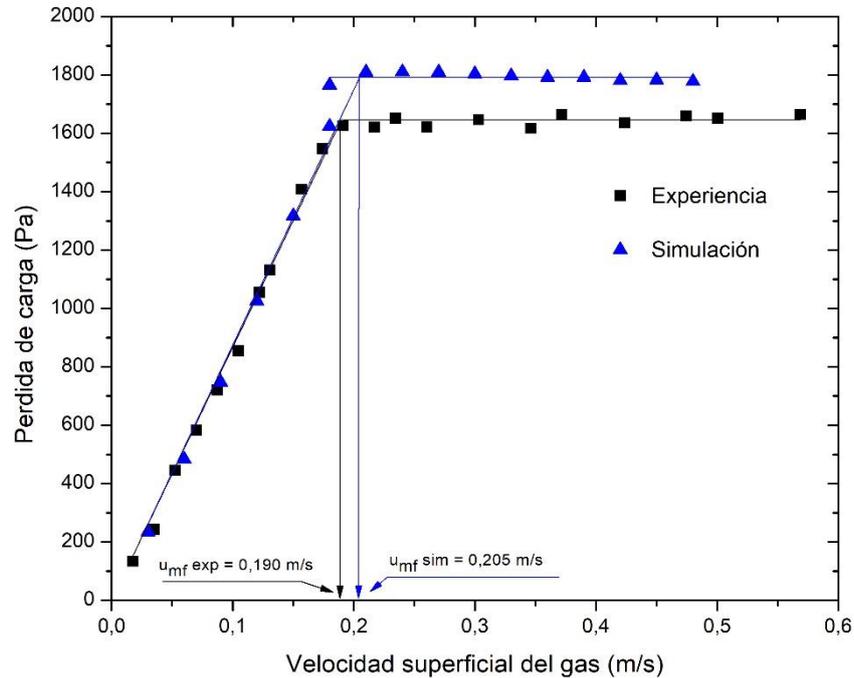


Figura 6.1 - Comparación de las pérdidas de carga obtenidas por CFD, con las medidas experimentalmente, para el lecho de arena.

Si bien en la parte correspondiente al lecho fluidizado, la diferencia observada entre las líneas de tendencia del ΔP promedio es mayor que la diferencia entre las líneas de tendencia en la parte del lecho fijo (son prácticamente coincidentes), el error en el ΔP promedio entre CFD y experiencia para la parte fluidizada del 8,89%, es aceptable.

Tabla 6.1 - Pérdidas de carga promedio durante la etapa de fluidización de la arena pura. Se presentan los valores teóricos, experimentales y el obtenido por CFD.

| | W/A (teórico) | Experiencia | CFD |
|--------------------------|---------------|-------------|--------|
| ΔP promedio [Pa] | 1837,5 | 1645,3 | 1791,6 |

El valor promedio obtenido por CFD de 1791,6 Pa, presenta un error de sólo el 2,5% con respecto al valor teórico de ΔP , correspondiente al peso del lecho (ver Tabla 4.3) sobre área transversal del tubo ($W/A= 1837,5$ Pa), mientras que, la pérdida de carga experimental promedio es de 1645,3 Pa, con un error del 10,5% con respecto al teórico W/A. Los datos son resumidos en la Tabla 6.1.

La discrepancia entre valor teórico y experimental puede explicarse por la influencia de las paredes del tubo que, en lechos estrechos, provoca una disminución de la pérdida de carga con respecto al valor teórico (Yang, 2003). Esto muestra que la CFD en este caso, reproduce con mayor exactitud el valor teórico esperado, que el que se obtuvo experimentalmente; o, dicho de otra manera, las simulaciones no reproducen el efecto que las paredes del tubo tienen en lechos estrechos.

Los valores de U_{mf} y ΔP promedio durante la etapa de lecho fluidizado, hallados experimentalmente y por CFD, se presentan en la [Tabla 6.2](#). Puede observarse que los errores relativos respecto a la experiencia para ΔP y U_{mf} son del mismo orden. La velocidad de mínima fluidización se determinó a partir de la intersección de las líneas de tendencia, de la misma forma que con los datos experimentales.

[Tabla 6.2](#) - Comparación de resultados obtenidos por CFD con valores experimentales para el lecho de arena pura.

| | CFD | Experiencia | Error % |
|-------------------------------------|--------|-------------|---------|
| U_{mf} [m/s] | 0,205 | 0,190 | 7,89 |
| ΔP promedio fluidizado [Pa] | 1791,6 | 1645,3 | 8,89 |

El análisis realizado, se complementa con la observación cualitativa de la formación de burbujas a distintas velocidades del gas, por medio de los diagramas de contorno de fracción volumétrica de sólido, obtenidos por CFD y presentados en la [Figura 6.2](#). Se puede apreciar el aumento del tamaño de las burbujas y de la agitación al incrementar la velocidad del gas, y una clara diferencia entre la fase burbuja y la fase densa o emulsión de partículas de arena, lo cual se corresponde con las observaciones realizadas durante los ensayos experimentales. Se compara el último diagrama de contorno (a $U_s = 0,45$ m/s) con su correspondiente imagen durante la experiencia.

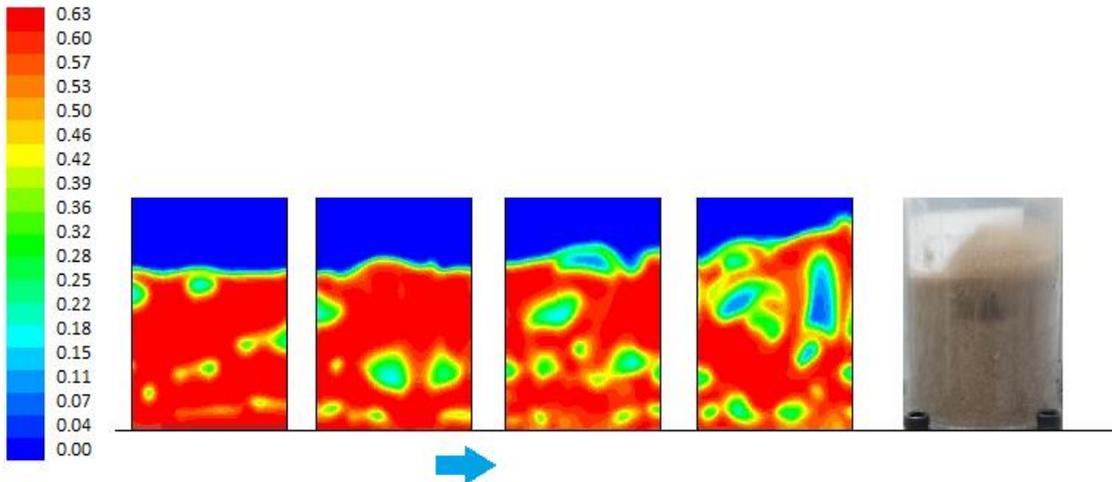


Figura 6.2 - Imágenes de fracción volumétrica de arena obtenidas por CFD a los 5 segundos de simulación, a las U_s de aire: (de izq. a der.) 0,27 m/s, 0,33 m/s, 0,39 y 0,45 m/s. Esta última se acompaña de una correspondiente imagen (a $U_s=0,45$ m/s) tomada durante la experiencia. La escala de colores indica la fracción de sólidos presentes en cada elemento de la malla.

6.3 – SIMULACIÓN DEL LECHO DE PARTÍCULAS DE BIOMASA

La Figura 6.3 muestra los resultados de las simulaciones de biomasa pura junto con los datos experimentales obtenidos. Se puede observar que no es posible representar, con el modelado por CFD, la región comprendida entre U_{if} y U_{cf} .

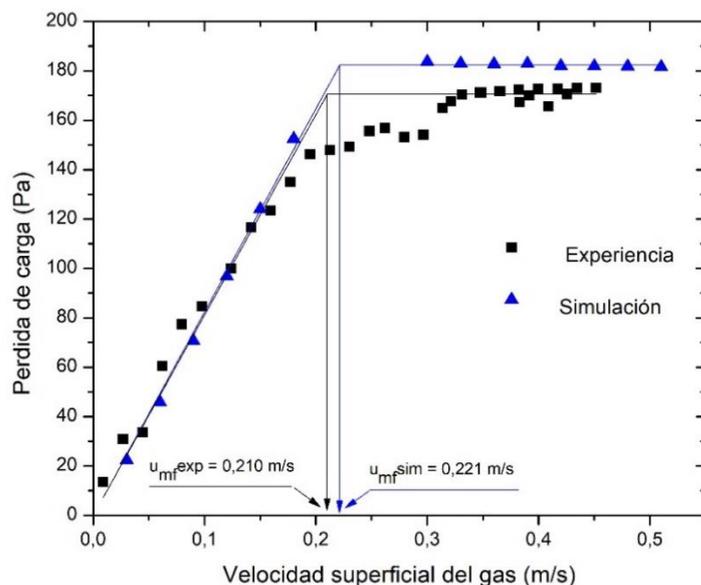


Figura 6.3 - Resultados experimentales y modelado por CFD para el lecho de biomasa pura.

Los valores de U_{mf} y pérdida de carga promedio en la etapa de lecho fluidizado, obtenidos experimentalmente y a partir de las simulaciones se resumen en la [Tabla 6.3](#). La U_{mf} experimental se calculó a partir de la curva de desfluidización de la etapa de lecho fijo, según lo recomendado por [Kunii y Levenspiel \(1991\)](#) y [Dhodapkar y col., \(2012\)](#); por esto, es la curva de desfluidización la representada en la [Figura 6.3](#), omitiendo la representación de la curva de fluidización (que si puede verse en la [Figura 4.4](#)).

[Tabla 6.3](#) - Lecho de biomasa pura. Comparación CFD con valores experimentales.

| | CFD | Experiencia | Error % |
|-------------------------------------|--------|-------------|---------|
| U_{mf} [m/s] | 0,221 | 0,210 | 5,24 |
| ΔP promedio fluidizado [Pa] | 182,36 | 170,52 | 6,94 |

En la [Figura 6.4](#) se muestran los diagramas de contorno de fracción volumétrica de sólidos obtenidos por CFD. Las velocidades consideradas son mayores a la U_{cf} .

Estas imágenes permiten analizar cualitativamente la formación y crecimiento de las burbujas con el aumento de velocidad, y muestran un sistema con grandes bolsones de gas y con una interfase no muy bien definida entre la fase burbuja y la fase emulsión. Este comportamiento, muy diferente al observado en la arena, se corresponde con las observaciones realizadas durante los ensayos experimentales. Se compara el último diagrama de contorno (a $U_s = 0,45$ m/s) con su correspondiente imagen durante la experiencia.

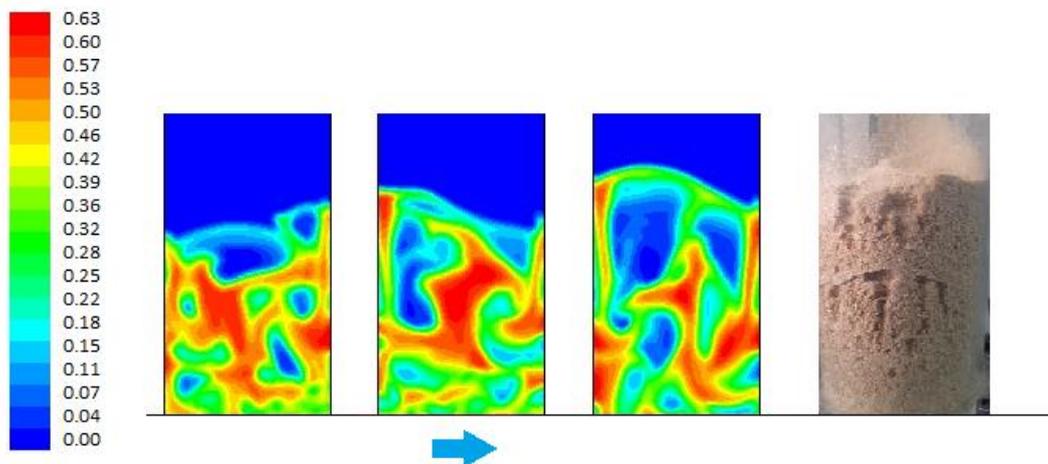


Figura 6.4 - Diagramas de contorno de la fracción volumétrica de sólidos del lecho de biomasa obtenidos por CFD a los 5 segundos de simulación, a las velocidades de aire (de izq. a der.): 0.33 m/s, 0.39 m/s y 0.45 m/s. Este último se acompaña de una correspondiente imagen (a $U_s = 0,45$ m/s) tomada durante la experiencia. La escala de colores indica la fracción de sólido.

6.4 – SIMULACIONES DE LA FLUIDIZACIÓN DE MEZCLAS ARENA-BIOMASA

En la [Tabla 6.4](#) se presentan los resultados de las simulaciones de las tres mezclas, con 15, 30 y 40% V/V de arena, donde se observa un error menor al 5% en la U_{mf} obtenida por CFD con respecto a los valores experimentales.

La metodología aplicada en las simulaciones de los sistemas binarios es similar a la desarrollada por [Garrido Makinistian \(2015\)](#) para el caso de mezclas de pellets de biomasa y arena.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la metodología de simulación propuesta es apropiada para predecir la U_{mf} de las mezclas arena-aserrín.

Se exponen en las subsecciones siguientes, los resultados de cada uno de los sistemas en particular.

Para los tres casos de mezclas, en las [Figuras 6.5, 6.7 y 6.9](#), al igual que para el caso de biomasa pura ([Figura 6.3](#)), sólo se representa la curva de desfluidización experimental en la zona de lecho fijo (omitiendo la de fluidización), ya que es la utilizada para calcular la U_{mf} ([Kunii y Levenspiel, 1991](#); [Dhodapkar y col., 2012](#)). Además, es con las curvas de desfluidización experimentales con las que se calcularon los coeficientes α y C_2 , necesarios para simular las etapas de lecho fijo.

Tabla 6.4 – Lechos de sistemas de mezclas arena-biomasa. Comparación CFD con valores experimentales.

| | | CFD | Experiencia | Error % |
|---------------|-------------------------------------|--------|-------------|---------|
| Arena 15% V/V | U_{mf} [m/s] | 0.200 | 0.192 | 4.17 |
| | ΔP promedio fluidizado [Pa] | 444.78 | 430.11 | 3.41 |
| Arena 30% V/V | U_{mf} [m/s] | 0.200 | 0.196 | 2.04 |
| | ΔP promedio fluidizado [Pa] | 853.15 | 835.86 | 2.07 |
| Arena 40% V/V | U_{mf} [m/s] | 0.192 | 0.193 | 0.52 |
| | ΔP promedio fluidizado [Pa] | 1060.9 | 1062.4 | 0.14 |

El análisis de los sistemas de mezclas es complementado con el estudio cualitativo de las respectivas imágenes de las fracciones de sólidos generadas por ANSYS Fluent, a diferentes velocidades superficiales de aire (Figuras 6.6, 6.8 y 6.10).

A partir de las simulaciones de los sistemas de mezclas, sólo pueden generarse imágenes por separado de las fracciones de sólidos de ambos tipos de partículas. En ellas se observa cómo la simulación reproduce el fenómeno de segregación de las partículas de arena más densas, en el fondo del lecho, y como este fenómeno disminuye con el aumento de velocidad de aire a través del mismo. A velocidades levemente superiores a U_{cf} , están fluidizados ambos tipos de partículas, pero con las partículas de arena segregadas en el fondo del lecho. A velocidades mayores, aumenta la cantidad de partículas de arena que ocupan la parte superior del lecho, y también aumenta la cantidad de partículas de biomasa que ocupan la parte inferior del lecho.

6.4.1 – SIMULACIÓN MEZCLA ARENA-BIOMASA. SISTEMA 15% V/V DE ARENA

En la Figura 6.5 se comparan los resultados de las simulaciones con los valores experimentales, para la mezcla con 15% V/V de arena.

Puede verse que, en la etapa de lecho fijo se reproduce casi con total exactitud la pérdida de carga, mientras que se observa un error del 3,41% en el ΔP de la región de lecho fluidizado. Esta diferencia da lugar a un error del mismo orden en la predicción de la U_{mf} .

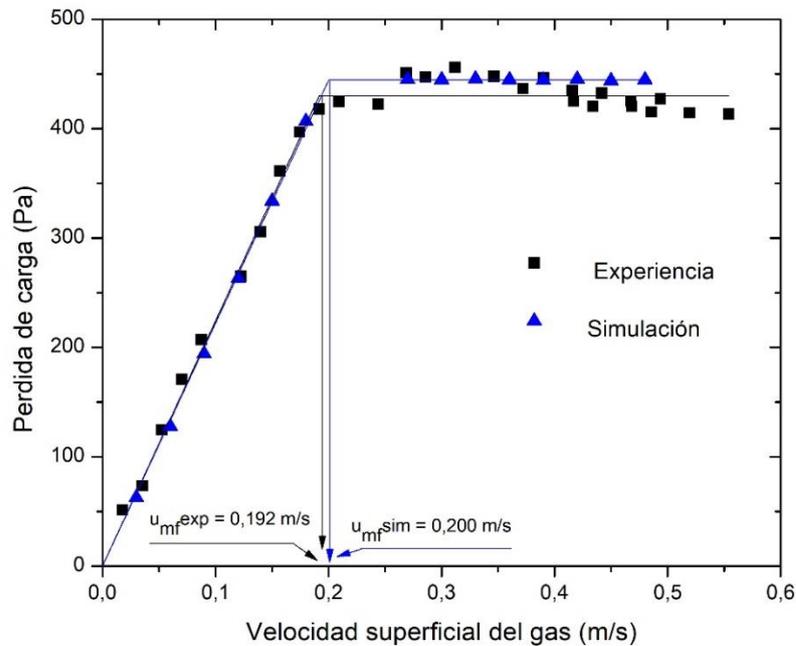


Figura 6.5 - Resultados experimentales y valores obtenidos por CFD para el sistema arena-biomasa con 15% V/V de arena.

La Figura 6.6 muestra cómo la simulación representa la disminución de la segregación de arena durante la etapa fluidizada, conforme aumenta la velocidad del aire a través del lecho.

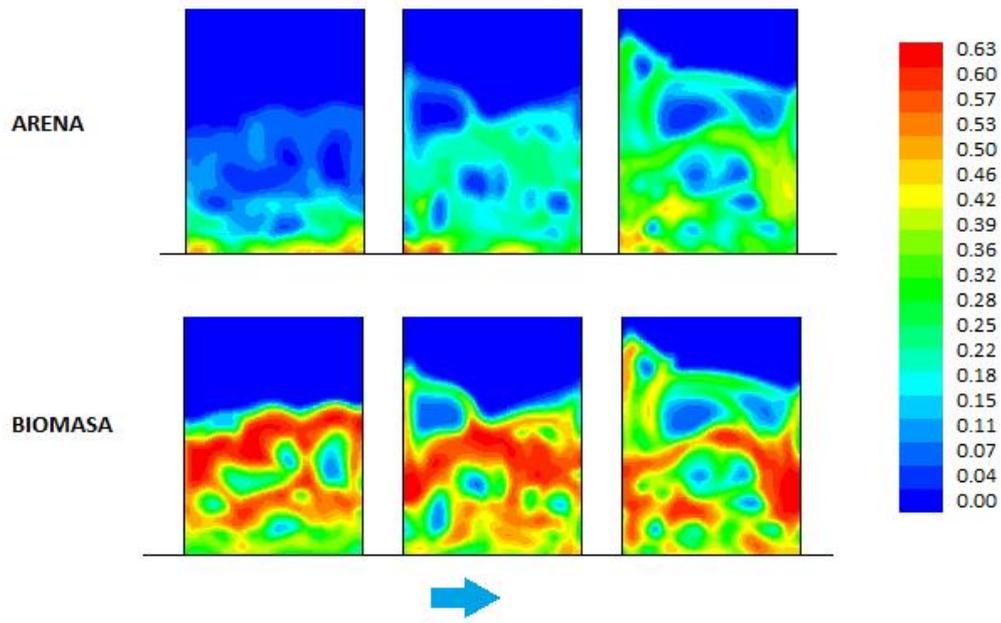


Figura 6.6 - Diagramas de contorno de arena (arriba) y de biomasa (abajo) obtenidos por CFD a los 5 segundos de simulación. Mezcla 15% V/V de arena, a las velocidades de aire (de izq. a der.): 0.27 m/s, 0.36 m/s y 0.45 m/s. La escala de colores indica la fracción de sólido.

6.4.2 – SIMULACIÓN MEZCLA ARENA-BIOMASA. SISTEMA 30% V/V DE ARENA

En la Figura 6.7 se comparan los resultados de las simulaciones con los valores experimentales para la mezcla con 30% V/V de arena. Se observa, al igual que en la mezcla con 15% de arena, que se reproduce de forma exacta la etapa de lecho fijo con el modelo utilizado en las simulaciones. En la etapa de lecho fluidizado, si se observa error de 2,07% en el valor de ΔP .

La Figura 6.8 muestra las fracciones de sólidos en el lecho a los 5 segundos de la simulación del lecho fluidizado para distintas velocidades de aire. Se verifica con estas imágenes generadas por CFD que el modelo adoptado es capaz de reproducir el efecto de segregación de las partículas más densas en el lecho, y que además la modelización predice que mayores velocidades de aire aumentan el mezclado de las partículas fluidizadas, disminuyendo dicha segregación.

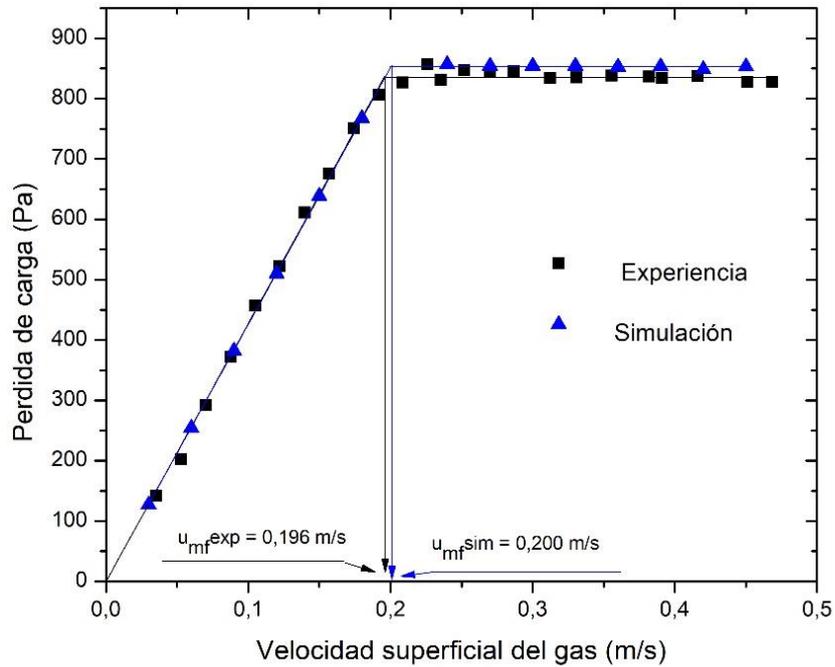


Figura 6.7 - Resultados experimentales y valores obtenidos por CFD para el sistema arena-biomasa con 30% V/V de arena.

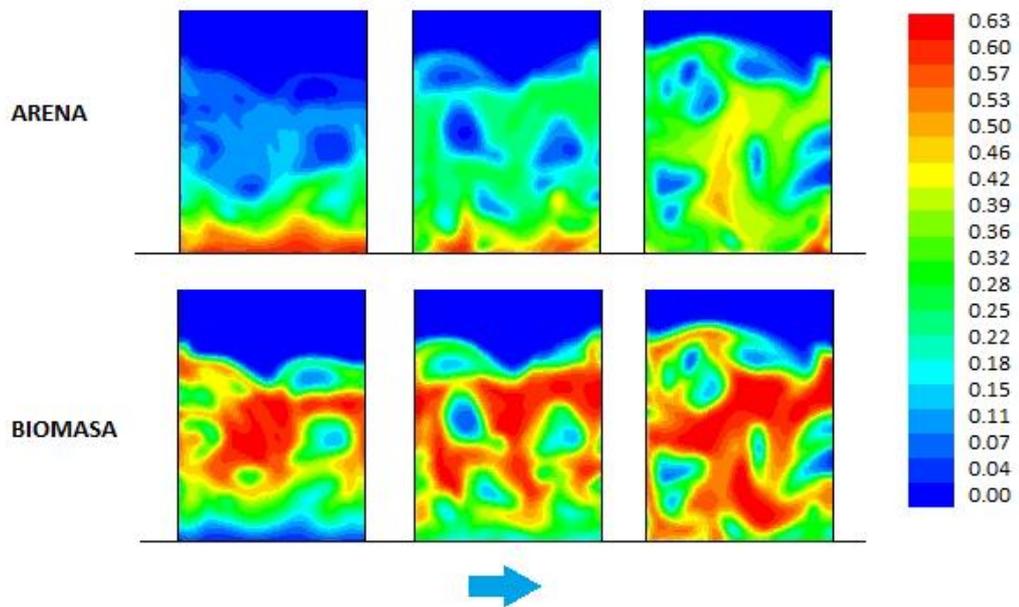


Figura 6.8 - Diagramas de contorno de arena (arriba) y de biomasa (abajo) obtenidos por CFD a los 5 segundos de simulación de la fluidización de la mezcla con 30% de arena, a las velocidades de aire (de izq. a der.): 0,24 m/s, 0,33 m/s, y 0,42 m/s. La escala de colores indica la fracción de sólido.

6.4.3 – SIMULACIÓN MEZCLA ARENA-BIOMASA. SISTEMA 40% V/V DE ARENA

Para la mezcla con 40% V/V de arena, la comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos por CFD mostrada en la [Figura 6.9](#) muestra una concordancia muy exacta tanto en la curva de lecho fijo como en la de lecho fluidizado, lo cual se traduce en un error de menos de un 1% al calcular la U_{mf} con los resultados de las simulaciones.

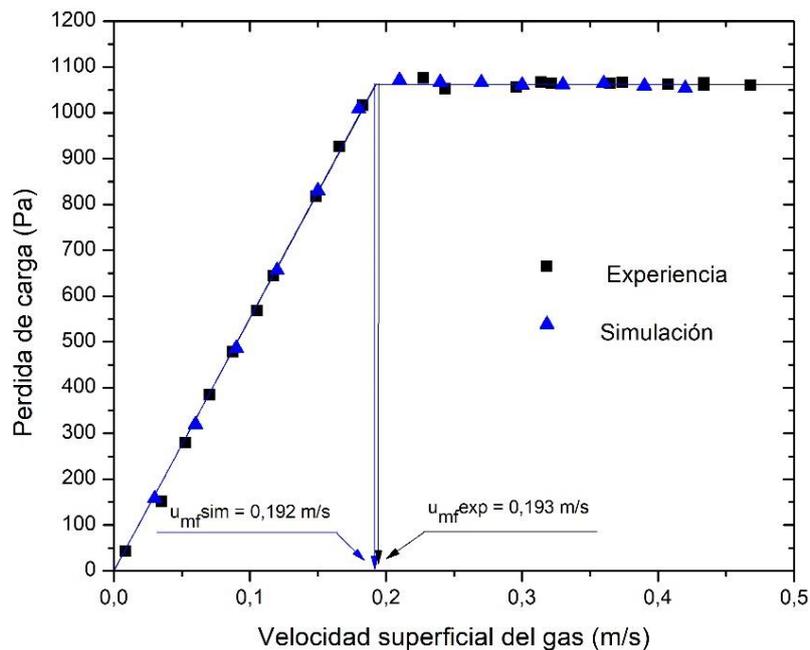


Figura 6.9 - Resultados experimentales y valores obtenidos por CFD para el sistema arena-biomasa con 40% V/V de arena.

La [Figura 6.10](#) indica cómo, para el último sistema analizado, la modelización por CFD es capaz de representar tanto los efectos de la segregación debida a la diferencia de densidades de las partículas, como también el aumento de agitación y mezcla con el aumento de velocidad del aire que atraviesa el lecho de partículas.

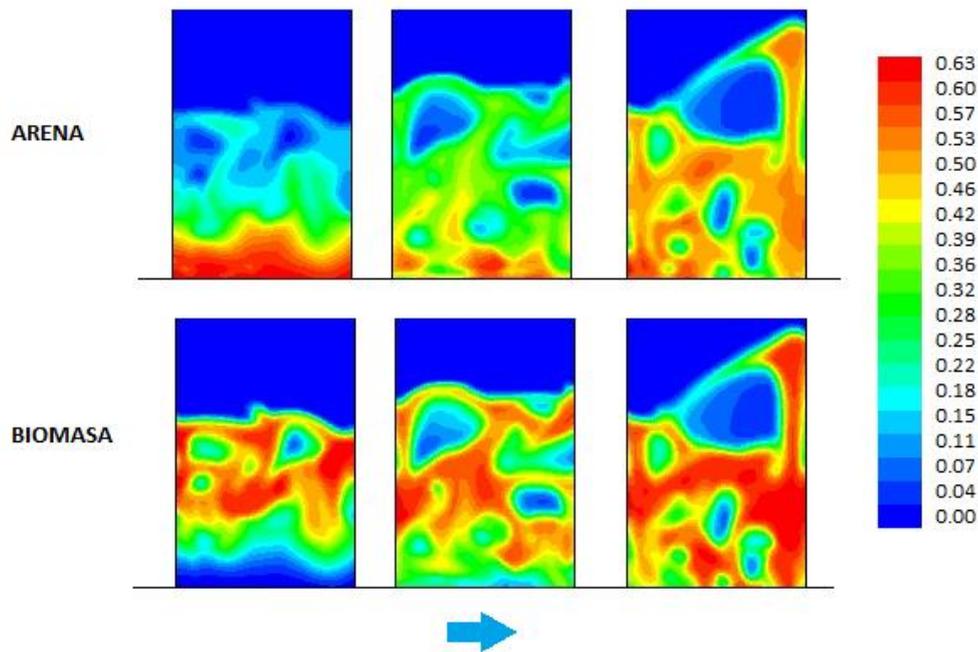


Figura 6.10 - Diagramas de contorno de arena (arriba) y de biomasa (abajo) obtenidos por CFD a los 5 segundos de simulación. Mezcla con 40% V/V de arena, a las velocidades de aire (de izq. a der.): 0.24 m/s, 0.33 m/s, y 0.42 m/s. La escala de colores indica la fracción de sólido.

6.5 –COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los valores de U_{mf} obtenidos, tanto experimentalmente como a partir de las simulaciones, se resumen en la Figura 6.11. Puede apreciarse que las estimaciones realizadas por CFD se encuentran dentro de una zona de error inferior al 10% para todo el rango de composiciones de mezclas arena-biomasa. También están comprendidas en esta región las velocidades calculadas para los componentes puros. Estos resultados permiten afirmar que la modelización desarrollada en esta tesis, reproduce, de manera satisfactoria, el comportamiento de los sistemas fluidizados estudiados.

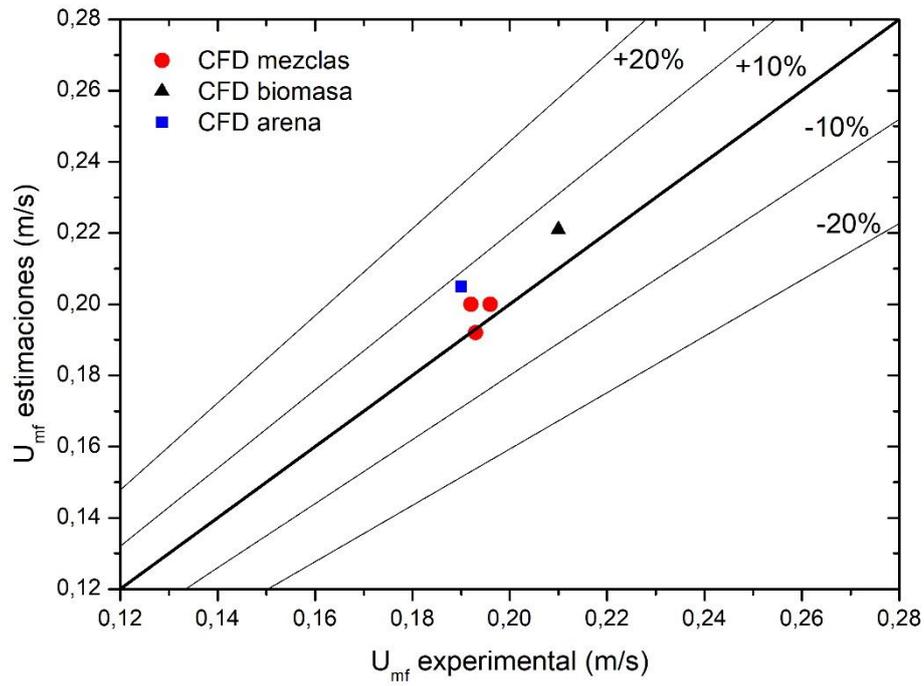


Figura 6.11 - Valores de U_{mf} de los cinco sistemas (arena y biomasa puras, y tres sistemas de mezclas arena-biomasa) obtenidos por CFD, comparados contra los resultados experimentales.

CAPÍTULO VII

ECUACIONES PREDICTIVAS DE LA VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

| | |
|--|-----|
| 7.1 – Introducción | 7.3 |
| 7.2 – Ecuaciones predictivas de la U_{mf} obtenidas por Paudel y Feng..... | 7.3 |
| 7.2.1 – Correlación para la U_{mf} de partículas inertes | 7.3 |
| 7.2.2 – Correlación para la U_{mf} de partículas de biomasa..... | 7.4 |
| 7.2.3 – Correlación para la U_{mf} de mezclas binarias..... | 7.4 |
| 7.3 - Ecuación predictiva de la U_{mf} obtenida por Rowe y Nienow..... | 7.5 |
| 7.4 - Ecuaciones predictivas de la U_{mf} obtenidas por Chiba y col..... | 7.5 |
| 7.4.1 – Correlación para la U_{mf} de mezclas binarias completamente segregadas | 7.5 |
| 7.4.2 – Correlación para la U_{mf} de mezclas binarias completamente mezcladas.. | 7.6 |
| 7.5 - Ecuaciones predictivas de la U_{mf} obtenidas por Noda y col..... | 7.6 |
| 7.5.1 – Correlación para B en mezclas binarias completamente mezcladas..... | 7.7 |
| 7.5.2 – Correlación para B en mezclas binarias parcialmente mezcladas..... | 7.8 |
| 7.6 - Ecuación predictiva de la U_{mf} visual de mezclas binarias obtenida por Bilbao y col..... | 7.8 |
| 7.7 - Ecuación predictiva de la U_{mf} obtenida por Oliveira y col..... | 7.9 |
| 7.8 – Aplicación al caso en estudio de las correlaciones para U_{mf} | 7.9 |

CAPÍTULO VII

ECUACIONES PREDICTIVAS DE LA VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

7.1– INTRODUCCIÓN

En los Capítulos anteriores se describió el estudio fluidodinámico del sistema binario arena-biomasa fluidizado por aire, realizado por vía experimental y por simulación, aplicando la técnica de CFD.

En el presente capítulo se presenta una recopilación bibliográfica de ecuaciones, desarrolladas para predecir la velocidad de mínima fluidización de sistemas binarios como el estudiado en esta tesis.

Una vez presentadas las ecuaciones, se las aplicará al caso en estudio, y se verificará su capacidad para predecir la U_{mf} las mezclas analizadas experimentalmente en el Capítulo IV.

7.2 – ECUACIONES PREDICTIVAS DE LA U_{MF} OBTENIDAS POR PAUDEL Y FENG

En su trabajo, Paudel y Feng (2013) desarrollaron correlaciones para calcular la U_{mf} de partículas inertes como arena o esferas de vidrio, de partículas de biomasa como aserrín o cascaras de nueces y, finalmente, a partir de estas correlaciones para sistemas puros, los autores desarrollaron una correlación para mezclas binarias.

7.2.1 – CORRELACIÓN PARA LA U_{MF} DE PARTÍCULAS INERTES

A partir de la recopilación de datos experimentales de diferentes autores, para partículas inertes, Paudel y Feng (2013) obtuvieron la ecuación empírica (7.1), que permite calcular el número de Reynolds evaluado en las condiciones de mínima fluidización (Re_{mf}) en función del número de Arquímedes (Ar).

$$Re_{mf} = [30.28^2 + 0.046Ar]^{1/2} - 30.28 \quad (7.1)$$

$$Re_{mf} = \frac{u_{mf} d_p \rho_g}{\mu_g} \quad (7.2)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (7.3)$$

El diámetro de partícula que se incluye en las ecuaciones es el diámetro de Sauter.

7.2.2 – CORRELACIÓN PARA LA U_{MF} DE PARTÍCULAS DE BIOMASA

Paudel y Feng (2013) verificaron que al utilizar la ecuación (7.1) para predecir la U_{mf} de partículas de biomasa como aserrín, cascara de nueces o residuos de maíz, se subestima la U_{mf} . Los autores atribuyen este resultado a la variedad de formas y tamaños que tienen las partículas de biomasa, a diferencia de las inertes, cuyas esfericidades suelen estar más cercanas a la unidad. Por esta razón y basándose en sus propios resultados experimentales y en los de otros autores, desarrollaron la ecuación (7.4) para partículas de biomasa en general.

$$Re_{mf} = [30.28^2 + 0.108Ar]^{1/2} - 30.28 \quad (7.4)$$

7.2.3 – CORRELACIÓN PARA LA U_{MF} DE MEZCLAS BINARIAS

Combinando las ecuaciones (7.1) y (7.4), y agregando un nuevo parámetro x_b , la fracción másica de biomasa en la mezcla, Paudel y Feng (2013) desarrollaron la ecuación (7.5).

$$Re_{mf} = \left\{ 30.28^2 + \left[0.046(1 - x_b) + 0.108x_b^{1/2} \right] Ar \right\}^{1/2} - 30.28 \quad (7.5)$$

El número de Ar para este caso se redefine a partir de un diámetro efectivo, d_{pe} , y una densidad efectiva ρ_{pe} (ecuaciones (7.6) y (7.7) respectivamente) que reemplazan el diámetro y densidad de la partícula en la expresión original de Ar.

$$d_{pe} = d_b d_s \left[\frac{x_b \rho_s + (1 - x_b) \rho_b}{x_b \rho_s d_s + (1 - x_b) \rho_b d_b} \right] \quad (7.6)$$

$$\frac{1}{\rho_{pe}} = \frac{x_b}{\rho_b} + \frac{1 - x_b}{\rho_s} \quad (7.7)$$

Las ρ_b y ρ_s son las densidades de las partículas de biomasa e inertes respectivamente y d_b y d_s son los diámetros de Sauter de las partículas.

7.3 - ECUACIÓN PREDICTIVA DE LA U_{MF} OBTENIDA POR ROWE Y NIENOW

Rowe y Nienow (1976) desarrollaron una ecuación empírica (7.8) para predecir la U_{mf} de mezclas binarias de partículas de igual densidad y forma, pero de diferente tamaño. Esta ecuación resulta en una U_{mf} de la mezcla intermedia entre las de los compuestos puros, y tiene buenos resultados bajo la restricción $(d_g/d_{sm}) < 3$, siendo d_g el diámetro de las partículas más grandes en la mezcla, y d_{sm} el de las más pequeñas.

$$u_{mf} = u_{sm} \left(\frac{u_g}{u_{sm}} \right)^{x_g^2} \quad (7.8)$$

Para el uso de esta ecuación deben conocerse por vía experimental las u_g y u_{sm} , que son las velocidades de mínima fluidización de las partículas de mayor y menor tamaño respectivamente. x_g es la fracción másica de las partículas más grandes en la mezcla.

7.4 - ECUACIONES PREDICTIVAS DE LA U_{MF} OBTENIDAS POR CHIBA Y COL.

En el trabajo de Chiba y col. (1979) se definen tres estados de mezclado en lechos fluidizados con sistemas binarios, completamente mezclado, completamente segregado y parcialmente mezclado. En un lecho completamente segregado se encuentran en el fondo solamente las partículas más densas y en el tope las menos densas. En un lecho completamente mezclado no hay variación en la concentración de los componentes a través de todo el lecho. En un lecho parcialmente mezclado habrá alta concentración del componente más denso en el fondo y alta concentración del componente menos denso en la región superior del lecho. Chiba y col. (1979) desarrollaron dos correlaciones, para los casos completamente mezclado y completamente segregado.

7.4.1 – CORRELACIÓN PARA LA U_{MF} DE MEZCLAS BINARIAS COMPLETAMENTE SEGREGADAS

Al componente de una mezcla binaria cuya U_{mf} es inferior se lo llama componente fluido, por ser el más fácil de llevar al estado fluidizado, y, al que presenta la U_{mf} más elevada, se lo denomina componente empacado. La ecuación (7.9) predice la U_{mf} de un

sistema binario que presenta total segregación durante la fluidización, conociendo previamente las velocidades de mínima fluidización de ambos componentes puros.

$$u_{mf} = \frac{u_f}{\left(1 - \frac{u_f}{u_{pk}}\right)x_f + \frac{u_f}{u_{pk}}} \quad (7.9)$$

u_f es la velocidad de mínima fluidización del componente fluido, u_{pk} es la del componente empacado y x_f es la fracción másica del componente fluido en la mezcla.

7.4.2 – CORRELACIÓN PARA LA U_{MF} DE MEZCLAS BINARIAS COMPLETAMENTE MEZCLADAS

La ecuación (7.10) permite calcular la U_{mf} de un sistema binario que, en la etapa de lecho fluidizado, está completamente mezclado. Dicha ecuación requiere el conocimiento previo de la densidad (ρ_f), diámetro (d_f) y velocidad de mínima fluidización del componente fluido (u_f), y de los parámetros $\bar{\rho}$ y \bar{d} , densidades y diámetros medios calculados a partir de las densidades y diámetros de los componentes puros según las ecuaciones (7.11) y (7.12).

$$u_{mf} = u_f \frac{\bar{\rho}}{\rho_f} \left(\frac{\bar{d}}{d_f}\right)^2 \quad (7.10)$$

$$\bar{\rho} = V_{fl}\rho_f + (1 - V_{fl})\rho_{pk} \quad (7.11) \quad \bar{d} = [N_f d_f^3 + (1 - N_f)d_{pk}^3]^{1/3} \quad (7.12)$$

En las ecuaciones (7.11) y (7.12) V_{fl} es la fracción volumétrica del componente fluido en la mezcla, y N_f es la fracción numérica del componente fluido en la mezcla y se calcula según la ecuación (7.13).

$$N_f = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{V_{fl}} - 1\right)\left(\frac{d_f}{d_{pk}}\right)^3} \quad (7.13)$$

7.5 - ECUACIONES PREDICTIVAS DE LA U_{MF} OBTENIDAS POR NODA Y COL.

El trabajo de Noda y col. (1986) se basó en la obtención de expresiones para determinar la U_{mf} de mezclas binarias, cuyas partículas difieren significativamente en diámetro y densidad. A partir de la ecuación (2.14) obtenida por Wen y Yu (1966), para

un sistema de un solo componente, Noda y col. (1986) definieron para un sistema binario, densidades y diámetros medios de las partículas ($\bar{\rho}_p$ y \bar{d}_p) según las ecuaciones (7.14) y (7.15).

$$\frac{1}{\bar{\rho}_p} = \frac{x_f}{\rho_f} + \frac{x_{pk}}{\rho_{pk}} \quad (7.14)$$

$$\frac{1}{\bar{\rho}_p \bar{d}_p} = \frac{x_f}{d_f \rho_f} + \frac{x_{pk}}{d_{pk} \rho_{pk}} \quad (7.15)$$

De esta forma, la (2.14) se reescribe como la ecuación (7.16).

$$Ar = ARe_{mf}^2 + BRe_{mf} \quad (7.16)$$

Donde las densidades y diámetros utilizados en las expresiones de Ar y Re_{mf} son $\bar{\rho}_p$ y \bar{d}_p . Los valores de A y de B fueron determinados experimentalmente. Para las experiencias de fluidización, Noda y col. (1986) utilizaron una gran variedad de partículas, mencionando entre otras, arena, aserrín, esferas de vidrio y legumbres.

A partir de las experiencias, el parámetro A está correlacionado con las propiedades de las partículas según la ecuación (7.17).

$$A = 36.2 \left(\frac{d_{pk} \rho_f}{d_f \rho_{pk}} \right)^{-0.196} \quad (7.17)$$

Para correlacionar al parámetro B, es necesario distinguir el estado de mezcla que presenta el lecho durante la etapa fluidizada.

7.5.1 – CORRELACIÓN PARA B EN MEZCLAS BINARIAS COMPLETAMENTE MEZCLADAS

Para los sistemas binarios que presentan un buen estado de mezclado al fluidizarlos, la ecuación (7.18) da un buen ajuste a las experiencias.

$$B = 1397 \left(\frac{d_{pk} \rho_f}{d_f \rho_{pk}} \right)^{0.296} \quad (7.18)$$

7.5.2 – CORRELACIÓN PARA B EN MEZCLAS BINARIAS PARCIALMENTE MEZCLADAS

Para los casos de lechos de partículas que presentaran un mezclado parcial al fluidizar y cumplen con las condiciones: $d_{pk}/d_f > 3$ y $\rho_{pk} \approx \rho_f$, Noda y col. (1986) propusieron la ecuación (7.19).

$$B = 6443 \left(\frac{d_{pk}\rho_f}{d_f\rho_{pk}} \right)^{-1.86} \quad (7.19)$$

7.6 - ECUACIÓN PREDICTIVA DE LA U_{mf} VISUAL DE MEZCLAS BINARIAS OBTENIDA POR BILBAO Y COL.

Alternativamente al método de determinación propuesto por Kunii y Levenspiel (1991) donde se obtiene la U_{mf} a partir de la intersección de las líneas de tendencia de pérdida de carga vs. velocidad del gas, Noda y col. (1986) y Bilbao y col. (1987) definieron alternativamente a la U_{mf} de mezclas binarias como el punto donde visualmente, durante la experiencia, ambos componentes están fluidizados.

Bilbao y col. (1987) obtuvieron una expresión para la determinación de esta U_{mf} visual, a partir de ensayos de fluidización de mezclas binarias de arena y paja de trigo. Los autores observaron durante las experiencias que el trigo no fluidizaba por sí solo, pero con el agregado de una proporción suficiente de arena, la mezcla si lo hacía. La ecuación (7.20) predice esta U_{mf} visual para el sistema estudiado por Bilbao y col. (1987).

$$u_{mf} = u_{pk} - (u_{pk} - u_f)X_f \quad (7.20)$$

Para utilizar la ecuación (7.20) es necesario conocer experimentalmente la u_f , velocidad de mínima fluidización del componente más fácilmente fluidizable de la mezcla binaria (componente fluido). Luego, se estima una velocidad de mínima fluidización del componente más difícilmente fluidizable (componente empacado), u_{pk} , según la ecuación (7.21) y se debe calcular una fracción real del componente fluido X_f según la ecuación (7.22).

$$u_{pk} = 50d_{pk}^{0.84} \quad (7.21)$$

$$X_f = \frac{x_f}{x_f + (\rho_f/\rho_{pk})(1-x_f)} \quad (7.22)$$

7.7 - ECUACIÓN PREDICTIVA DE LA U_{MF} OBTENIDA POR OLIVEIRA Y COL.

En su trabajo, Oliveira y col. (2013) experimentaron con mezclas binarias de partículas de biomasa (residuos de tabaco, bagazo de sorgo y cascara de soja) y arena, y a partir de los resultados experimentales de las fluidizaciones desarrollaron una correlación empírica, ecuación (7.25), para la predicción de la U_{mf} , utilizando densidades y diámetros efectivos de las mezclas según las ecuaciones (7.23) y (7.24).

$$\rho_{ef} = x_b \rho_b + x_s \rho_s \quad (7.23) \quad d_{ef} = d_s \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_b} \right) \left(\frac{d_b}{d_s} \right) \right]^{x_b/x_s} \quad (7.24)$$

Las ρ_b , ρ_s , x_b y x_s son las densidades de las partículas de biomasa y arena y las fracciones másicas de biomasa y arena respectivamente. Los diámetros de las partículas son d_b y d_s .

$$u_{mf} = 1.17 \times 10^{-4} \left[\frac{d_{ef}^2 (\rho_{ef} - \rho_g) g}{\mu_g} \left(\frac{\rho_{ef}}{\rho_g} \right)^{1.23} \right]^{0.4916} \quad (7.25)$$

g es la aceleración de la gravedad, μ_g y ρ_g son la viscosidad y densidad del agente gaseoso fluidizante.

7.8 – APLICACIÓN AL CASO EN ESTUDIO DE LAS CORRELACIONES PARA PREDECIR U_{MF}

Las ecuaciones recopiladas en el presente capítulo, fueron aplicadas para calcular las U_{mf} de las mezclas de arena y biomasa que se evaluaron experimentalmente (descriptas en el Capítulo IV). En la Figura 7.1 se comparan los valores de U_{mf} obtenidos con las predicciones contra los resultados experimentales, para los sistemas de mezclas con 15, 30 y 40% V/V de arena.

Se desprende de la Figura 7.1, que las ecuaciones de Noda y col. (1986) para sistemas completamente mezclados, la de Noda y col. (1986) para mezclas binarias parcialmente mezcladas, la ecuación de Chiba y col. (1979) para lechos completamente mezclados y la ecuación de Oliveira y col. (2013) no representan al sistema binario ensayado, teniendo errores relativos respecto a los resultados experimentales mayores al

30%. Esto resulta razonable teniendo en cuenta las limitaciones o condiciones bajo las cuales fueron desarrolladas:

- Las mezclas ensayadas presentaban segregación a bajas velocidades de aire durante la etapa fluidizada, por lo que es de esperarse que las ecuaciones de [Chiba y col. \(1979\)](#) y [Noda y col. \(1986\)](#) para lechos completamente mezclados no representen adecuadamente al sistema.
- Los ensayos a partir de los cuales [Oliveira y col. \(2013\)](#) desarrollaron su ecuación predictiva eran de mezclas de partículas de biomasa y arena, pero la biomasa no fue en ninguno de los casos aserrín de madera como el que se utilizó para las experiencias de este trabajo.
- La ecuación de [Noda y col. \(1986\)](#) para sistemas binarios parcialmente mezclados tiene la restricción de que las densidades de ambos tipos de partículas deben ser similares, lo que no se cumple en el sistema binario estudiado en la presente tesis (ver [Tabla 4.2](#)).

La correlación para la U_{mf} visual obtenida por [Bilbao y col. \(1987\)](#) predice los resultados experimentales del [Capítulo IV](#) con un error menor al 30%, pero la U_{mf} experimental con la cual se comparan las estimaciones de [Bilbao y col. \(1987\)](#) en la [Figura 7.1](#) no son las visuales (estado en donde ambos tipos de partículas están fluidizados), sino que son las obtenidas por el método de [Kunii y Levenspiel \(1991\)](#) de intersección de las líneas de tendencia de las etapas de lecho fijo y lecho fluidizado. Por esto, las estimaciones de [Bilbao y col. \(1987\)](#) no pueden compararse con las U_{mf} calculadas en el [Capítulo IV](#), sino que deberían compararse contra las U_{cf} (ver [Tabla 4.4](#)).

Las estimaciones obtenidas a partir de las ecuaciones de [Paudel y Feng \(2013\)](#) presentan también errores menores al 30% con respecto a los resultados experimentales y tienen, además, la ventaja de que no necesitan conocer previamente las U_{mf} experimentales de los sistemas puros, sino que también las estiman, y con un error menor al 30%.

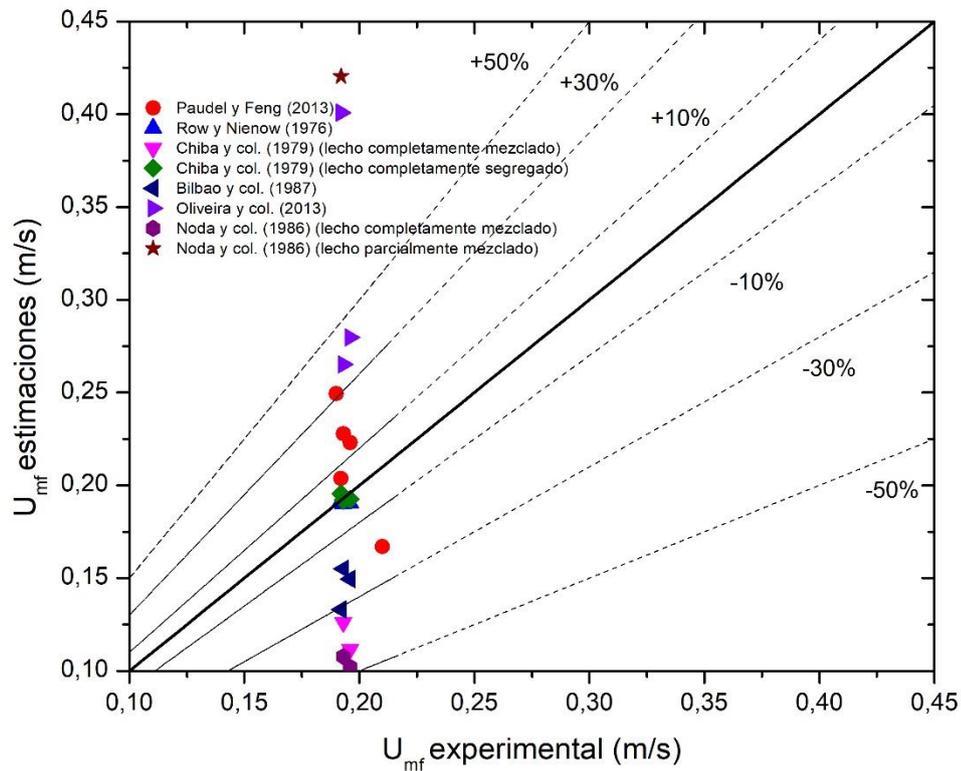


Figura 7.1 – U_{mf} calculadas con las ecuaciones predictivas de la bibliografía, comparadas contra las U_{mf} experimentales para los sistemas ensayados en la presente tesis.

La correlación obtenida por [Rowe y Nienow \(1976\)](#) predice las U_{mf} de las mezclas con un error menor al 10%, pero no es adecuado utilizarla para representar este sistema, ya que fue desarrollada para sistemas binarios cuyas densidades sean similares.

La ecuación predictiva de [Chiba y col. \(1979\)](#) para lechos completamente segregados, resulta ser la más adecuada para predecir la U_{mf} de las mezclas estudiadas, reproduciendo los valores experimentales con un error menor al 2%. Cabe recordar que las mezclas estudiadas presentaron segregación durante los ensayos, especialmente a bajas velocidades de aire.

En la [Tabla 7.1](#) se comparan los resultados obtenidos con la ecuación propuesta por [Chiba y col. \(1979\)](#) para lechos completamente segregados con los valores experimentales.

Tabla 7.1 - Valores de U_{mf} para los sistemas de mezclas calculados con la ecuación de Chiba y col. (1979) para lechos completamente segregados, comparados con los resultados experimentales.

| %V/V | Arena 40% | Arena 30% | Arena 15% |
|---|------------------|------------------|------------------|
| U_{mf} exp. [m/s] | 0.193 | 0.196 | 0.192 |
| U_{mf} Chiba y col. [m/s] | 0.192 | 0.193 | 0.195 |
| Error rel. % | 0.52 | 1.53 | 1.56 |

CAPÍTULO VIII**RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

| | |
|----------------------------------|-----|
| 8.1 - Introducción | 8.3 |
| 8.2 – Resumen de resultados..... | 8.3 |
| 8.3 - Conclusiones..... | 8.4 |

CAPÍTULO VIII

RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

8.1– INTRODUCCIÓN

La intención de este capítulo es que sea una síntesis de los resultados obtenidos, por tres diferentes métodos, en el presente trabajo.

Los tres métodos utilizados fueron:

- Medición experimental de la U_{mf} .
- Simulación de las etapas de lecho fijo y fluidizado y posterior cálculo de U_{mf} a partir de la intersección de las líneas de tendencia generadas con las simulaciones.
- Estimación de la U_{mf} de los sistemas de mezclas binarias a partir de ecuaciones predictivas.

8.2– RESUMEN DE RESULTADOS

En la [Figura 8.1](#) se resumen en un solo gráfico, los valores de U_{mf} obtenidos por los distintos métodos, para los sistemas puros y mezclas estudiados. Para el caso de valores de U_{mf} obtenidos por medio de ecuaciones predictivas, se presentan los resultados calculados a partir de la ecuación de [Chiba y col. \(1979\)](#) para sistemas segregados, por ser esta la estimación más exacta y cuyas hipótesis cumplen con las condiciones del caso analizado.

Como puede observarse, todos los resultados obtenidos presentan, con respecto a la medida experimental, errores inferiores al 10%.

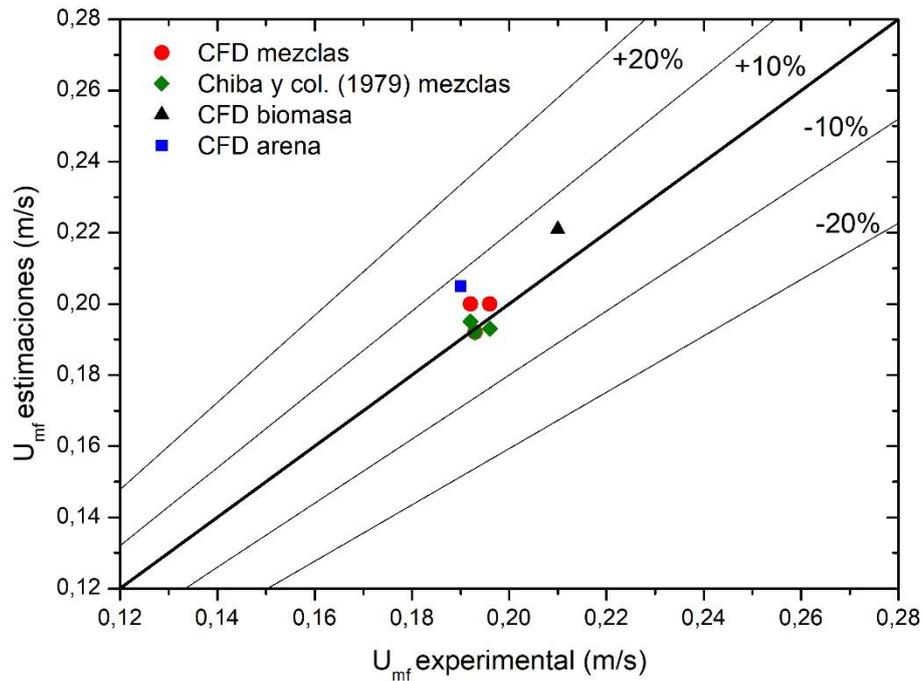


Figura 8.1 - Valores de U_{mf} para los sistemas estudiados. Se representan los resultados de los tres sistemas de mezclas obtenidos con la estimación de Chiba y col. (1979) para lechos completamente segregados y los cinco obtenidos por CFD según la modelización de la presente tesis, comparados contra los resultados experimentales.

8.3- CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo el estudio fluidodinámico de mezclas binarias arena-biomasa, utilizando aire como agente fluidizante. Se comenzaron las actividades experimentales trabajando con los sistemas puros de arena y biomasa (aserrín proveniente del aserradero Abra Ancha), y luego se extendió el estudio a sistemas binarios, mezclas de biomasa y material inerte, con mayor aplicación en los equipos de gasificación industriales.

Durante los trabajos experimentales, se afianzaron y profundizaron los conocimientos teóricos previamente adquiridos sobre el fenómeno de fluidización y se confirmó la existencia de dos regímenes de fluidización diferentes tanto en la biomasa como en las mezclas biomasa-arena. Este fenómeno da origen a la definición de dos velocidades de fluidización adicionales: U_{if} y U_{cf} .

Se observó que el agregado de arena a un lecho compuesto enteramente por aserrín, aun en concentraciones bajas, permite reducir las fuerzas de cohesión y enlace entre partículas de biomasa, disminuyendo la formación de canales preferenciales y, por lo tanto, favoreciendo la fluidización.

Paralelamente a la experimentación, otro foco a cubrir fue la adquisición de conocimientos generales relacionados con la CFD, y en particular con la herramienta de simulación utilizada, el *software* de fluidodinámica computacional ANSYS-Fluent 18.2. Para realizar las simulaciones se siguió una metodología similar a la desarrollada por [Garrido Makinistian \(2015\)](#) para el caso de mezclas de pellets de biomasa y arena, con adaptaciones propias debido a las diferentes características de las partículas utilizadas.

Al igual que en las experiencias de laboratorio, a la hora de realizar las simulaciones, se partió por las de los sistemas puros, y luego se procedió a simular las mezclas arena-biomasa.

En relación al estado de agitación de los lechos fluidizados, se pudo apreciar que las imágenes de fracción de sólido generadas por CFD coinciden cualitativamente con las observaciones experimentales.

La validación de las simulaciones, realizada comparando los valores de las velocidades de mínima fluidización obtenidas por CFD con los valores experimentales, arrojó los siguientes resultados:

- Errores inferiores al 10% para los casos de los compuestos puros, arena y biomasa.
- Errores inferiores al 5% para las tres mezclas analizadas.

Con la base en estos resultados, se pudo confirmar la utilidad del *software* ANSYS-Fluent como una poderosa herramienta de simulación del comportamiento fluidodinámico de lechos fluidizados de mezclas de aserrín y arena.

Queda pendiente para futuras investigaciones, la implementación de un modelado análogo, pero empleando un modelo de arrastre diferente al de Gidaspaw, con el afán de disminuir el error al estimar la U_{mf} de los sistemas arena-biomasa analizados en este trabajo

Finalizada la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados de las simulaciones, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre ecuaciones predictivas de la U_{mf} de sistemas binarios biomasa-inerte. Dichas ecuaciones fueron aplicadas a las condiciones del sistema en estudio (diámetros medios y densidades de las partículas), y se encontró que dicho sistema es compatible con las hipótesis de la correlación desarrollada por [Chiba y col. \(1979\)](#) para lechos completamente segregados. Esta estimación reproduce con un error menor al 2% el valor de la velocidad de mínima fluidización de las mezclas arena-biomasa ensayadas, convirtiéndola en una herramienta muy útil una vez conocidas las velocidades de mínima fluidización de los sistemas puros.

Así, puede afirmarse que fueron alcanzados los objetivos del trabajo, pero debe tenerse en consideración que esta es solo una etapa preliminar de un objetivo más general aún: el estudio y comprensión del proceso completo de gasificación de biomasa para la generación de energía, tanto experimentalmente como por CFD, para finalmente poder llegar a un análisis de la factibilidad de su aplicación industrial en la región Comahue.

NOMENCLATURA

| | |
|-------------|---|
| A | Sección transversal del lecho, m^2 . |
| Ar | Número de Arquímedes de la partícula, (adimensional). |
| C_2 | Factor de resistencia inercial, m^{-1} . |
| \bar{d} | Diámetro medio de partículas en mezcla binaria (Chiba y col.), m. |
| d_b | Diámetro de Sauter de partícula de biomasa, m. |
| d_{ef} | Diámetro medio de partículas en una mezcla binaria (Oliveira y col.), m. |
| d_f | Diámetro de Sauter de partícula fluida en mezcla binaria, m. |
| d_g | Diámetro de Sauter de partícula grande en mezcla binaria, m. |
| d_i | Diámetro medio de cada una de las partículas presentes en una muestra de partículas, m. |
| d_p | Diámetro de partícula, m. |
| \bar{d}_p | Diámetro medio de partículas en mezcla binaria (Noda y col.), m. |
| d_{pe} | Diámetro efectivo de partículas en una mezcla binaria (Paudel y Feng), m. |
| d_{pk} | Diámetro de Sauter de partícula empacada en mezcla binaria, m. |
| d_s | Diámetro de Sauter de partícula inerte, m. |
| d_{sm} | Diámetro de Sauter de partícula pequeña en mezcla binaria, m. |
| d_{sup} | Diámetro de una esfera de superficie equivalente, m. |
| d_{sv} | Diámetro de una esfera de superficie por unidad de volumen, m. |
| d_v | Diámetro de una esfera de volumen equivalente, m. |
| g | Aceleración de la gravedad, m/s^2 . |

| | |
|-----------|--|
| H | Altura del lecho, m. |
| H_{mf} | Altura del lecho en el estado de mínima fluidización, m. |
| K_{pq} | Coefficiente de intercambio sólido-fluido, kg/s. |
| L | Altura del lecho fijo, m. |
| N_f | Fracción numérica del componente fluido en la mezcla binaria, (adimensional). |
| p | Presión, Pa. |
| P/P | Fracción en peso de la mezcla, (adimensional). |
| Q_g | Caudal de gas, m ³ /s. |
| Q_p | Flujo volumétrico de partículas, m ³ /s. |
| Re | Número de Reynolds de la partícula (adimensional) |
| Re_{mf} | Número de Reynolds de la partícula en condiciones de mínima fluidización (adimensional). |
| S | Superficie externa de partícula, m ² . |
| S_i | Término fuente para la ecuación de momento, Pa/m. |
| u | Velocidad lineal del fluido, m/s |
| U_{cf} | Velocidad de fluidización completa, m/s. |
| u_f | Velocidad de mínima fluidización de partículas fluidas en la mezcla binaria, m/s. |
| u_g | Velocidad de mínima fluidización de partículas grandes en la mezcla binaria, m/s. |
| $u_{i,j}$ | Componente de la velocidad en la dirección i,j, m/s. |
| U_{if} | Velocidad de fluidización incipiente, m/s. |
| U_{mf} | Velocidad mínima de fluidización, m/s. |
| u_p | Velocidad lineal de sólidos, m/s. |

| | |
|---------------------|---|
| U_p | Velocidad superficial de sólidos, m/s. |
| u_{pk} | Velocidad de mínima fluidización de partículas empacadas en la mezcla binaria, m/s. |
| $u_{rel}; u_{slip}$ | Velocidad relativa entre sólido y fluido, m/s. |
| U_s | Velocidad superficial, m/s. |
| u_{sm} | Velocidad de mínima fluidización de partículas pequeñas en la mezcla binaria, m/s. |
| U_t | Velocidad terminal, m/s. |
| V | Volumen de partícula, m ³ . |
| V/V | Fracción volumétrica de la mezcla, (adimensional). |
| V_f | Fracción volumétrica de sólidos en el lecho, (adimensional). |
| V_{fl} | Fracción volumétrica del componente fluido en la mezcla binaria, (adimensional). |
| V_{real} | Volumen real de las partículas en el lecho, m ³ . |
| V_{total} | Volumen total de un lecho, m ³ . |
| W | Peso, N. |
| x_b | Fracción másica de biomasa en la mezcla binaria, (adimensional). |
| x_f | Fracción másica del componente fluido en la mezcla binaria, (adimensional). |
| X_f | Fracción real del componente fluido en la mezcla binaria, (adimensional). |
| x_g | Fracción másica de partículas grandes en la mezcla binaria, (adimensional). |
| x_i | Fracción másica de partículas de diámetro medio d_i presentes en una muestra de partículas, (adimensional). |

| | |
|----------|---|
| x_{pk} | Fracción másica del componente empacado en la mezcla binaria, (adimensional). |
| x_s | Fracción másica de inerte en la mezcla binaria, (adimensional). |

SIMBOLOS GRIEGOS

| | |
|--------------------|--|
| α | Permeabilidad del medio poroso, m^2 . |
| β | Factor de relajación, (adimensional) |
| ΔP | Diferencia de presión en el lecho, Pa. |
| $\Delta\phi$ | Variación en el escalar de interpolación de una iteración a otra, (adimensional). |
| ε | Porosidad (adimensional). |
| ε_{mf} | Porosidad en el estado de mínima fluidización (adimensional) |
| φ | Esfericidad (adimensional). |
| ϕ | Escalar de esquemas de interpolación, (adimensional). |
| ρ | Densidad, kg/m^3 . |
| $\bar{\rho}$ | Densidad media de partículas en la mezcla binaria (Chiba y col), kg/m^3 . |
| ρ_{abs} | Densidad absoluta de partícula, kg/m^3 . |
| ρ_b | Densidad de biomasa, kg/m^3 . |
| ρ_{ef} | Densidad efectiva de partículas en la mezcla binaria (Oliveira y col.), kg/m^3 . |
| ρ_f | Densidad del componente fluido en la mezcla binaria, kg/m^3 . |
| ρ_g | Densidad del agente fluidizante, kg/m^3 . |
| ρ_p | Densidad aparente de partícula, kg/m^3 . |

| | |
|---------------------|--|
| $\overline{\rho_p}$ | Densidad media de partículas en la mezcla binaria (Noda y col.), kg/m ³ . |
| ρ_{pe} | Densidad efectiva de la mezcla binaria (Paudel y Feng), kg/m ³ . |
| ρ_{pk} | Densidad del componente empacado en la mezcla binaria, kg/m ³ . |
| ρ_s | Densidad de partículas inertes, kg/m ³ . |
| μ | Viscosidad, Pa s. |
| μ_g | Viscosidad del agente fluidizante, Pa s. |

ACRÓNIMOS

| | |
|-----------|---|
| CFD | Computational Fluid Dynamics. |
| DF | Desfluidización. |
| F | Fluidización. |
| MVF | Método de Volúmenes Finitos. |
| RAM | Random Access Memory. |
| SIMPLE | Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations. |
| PC-SIMPLE | Phase Coupled SIMPLE. |
| VOF | Volume of Fluid. |

REFERENCIAS

- Asegehegn, T.W., Schreiber, M. y Krautz, H.J., *Numerical Study of Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds Hydrodynamics: Influence of Immersed Horizontal Tubes and Data Analysis*, International Journal of Chemical Reactor Engineering, 9, Art. 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.
- Baeyens, J. y Geldart, D., *An Investigation into Slugging Fluidized Beds*, Chemical Engineering Science, 29, 255-265, 1974.
- Basu, P., *Biomass Gasification and Pyrolysis, Practical Design and Theory*, Elsevier Inc., Estados Unidos, 2010.
- Bilbao, R., Lezaun, J. y Abanades, J.C., *Fluidization velocities of sand/straw binary mixtures*, Powder Technology, 52, 1–6, 1987.
- Clarke, K., Pugsley, T. y Hill, G., *Fluidization of moist sawdust in binary particle systems in a gas-solid fluidized bed*, Chemical Engineering Science, 60, 6909-6918, 2005.
- Cornelissen, J.T., Taghipour, F., Escudié, R., Ellis, N. y Grace J.R., *CFD modeling of a liquid-solid fluidized bed*, Chemical Engineering Science, 62, 6334-6348, 2007.
- Chiba, S., Chiba, T., Nienow, A.W. y Kobayashi, H., *The minimum fluidization velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures*, Powder Technology, 22, 255–269, 1979.
- Chorin, A.J., *Numerical Solution of Navier-Stokes Equations*, Mathematics of Computation, 22, 745-762, 1968.
- Darton, R.C., La Nauze, R.D., Davison, J.F. y Harrison D., *Bubble Growth due to Coalescence in Fluidized Beds*, Trans. I. Chemical Engineering, 55, 274-280, 1977.

- Davidson, J.F. y Harrison, D., *Fluidized Particles*, Cambridge Univ. Press, Nueva York, 1963.
- Ding, J. y Gidaspow D., *A Bubbling Fluidization Model using Kinetic Theory of Granular Flow*, AIChE Journal, 36, 523-538, 1990.
- Dhodapkar, S.V., Zaltash, A. y Klinzing, G., *A primer on gas-solids fluidization*, Chemical Engineering, 119, 38-47, 2012.
- Duarte, C.R., Murata, V. y Barrozo, M., *Experimental and numerical study of spouted bed fluid dynamics*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 25, 95-107, 2008.
- Encinar, J. M., González, J. F., Rodríguez, J. J. y Ramiro, M. J., *Catalysed and uncatalysed steam gasification of eucalyptus char: influence of variables and kinetic study*, Fuel, 80(14), 2025–2036, 2001.
- Ergun, S., *Fluid Flow Through Packed Columns*, Chem. Eng. Prog., 48, 89-94, 1952.
- Fluent Inc., *ANSYS- Fluent User's Guide*, 2017.
- Froment G. y Bischoff K., *Chemical reactor analysis and design*, 2nd ed. Wiley Series in Chemical Engineering, New York, 1990.
- Garrido Makinistian, F., *Análisis y Simulación de un Lecho Fluidizado de la Mezcla Binaria Biomasa-Arena Empleando la Técnica de CFD*, Tesis de Grado Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNCo, 2015.
- Geldart, D., *Types of Gas Fluidization*, Powder Technology, 7, 285-292, 1973.
- Gibilaro, L., *Fluidization Dynamics*, Butterworth Heinemann, London, 2001.
- Harrison, D. y Leung, L., *Bubble formation at an orifice in a fluidized bed*, Chemical Engineering Research and Design, 39, 1961.
- Hosseini, S.H., Ahmadi, G., Rahimi, R., Zivdar, M. y 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. y Kantzas A., *CFD Modeling and Validation of Bubble Properties for a Bubbling Fluidized Bed*, *Industrial and Engineering Chemistry*, 44, 4254-4266, 2005.
- Jackson, R., *The Dynamics of Fluidized Particles*, Cambridge Univ. Press, Nueva York, 2000.
- Kunii, D. y Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.
- Noda, K., Uchida S., Makino T. y Kamo H., *Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixture of Particles with Large Size Ratio*, *Powder Technology*, 46, 149-154, 1986.
- Oliveira P., Cardoso T. y Ataíde, C., *Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: Minimum fluidization velocity and particle segregation*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 72, 113-121, 2013.
- Ozahi, E., Gundogdu, M.Y. y Carpinlioglu, M., *A Modification on Ergun's Correlation for Use in Cylindrical Packed Beds with Non-Spherical Particles*, *Advanced Powder technology*, 19, 369-381, 2008.
- Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, Nueva York, 1980.
- Paudel, B. y Feng, Z., *Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles*, *Powder Technology*, 237, 134-140, 2013.
- Proenza Pérez, N., Travieso, D., Blanco, E., Santana, J., Verdú, R. y Silveira, J., *Fluid Dynamic study of mixtures of sugarcane bagasse and sand particles: Minimum fluidization velocity*, *Biomass and Bioenergy*, 107, 135-149, 2017.
- Ranade, V., *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering*, Academic Press, 2002.
- Rao, T., y Bheemarasetti, J.V., *Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands*, *Energy*, 26, 633-644, 2001.
- Reyes, A., Falcoz, Q., Zambon, M., Mazza, G., Gauthier, D. y Flamant, G., *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. y Causat B., *Multifluid Eulerian Modeling of Dense Gas-Solids Fluidized Bed Hydrodynamics: Influence of the Dissipation Parameters*, Chemical Engineering Science, 63, 5540-5551, 2008.
- Rhodes, M., *Introduction to particle technology*, John Wiley & Sons, Inglaterra, 1998.
- Rowe, P. y Nienow, A., *Particle Mixing and Segregation in Gas Fluidised Beds. A Review*, Powder Technology, 15, 141–147, 1976.
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P. y Mendivil, M. A., *Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers.*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 174–183, 2013.
- Sau, D.C. y Biswal, K.C., *Computational Fluid Dynamics and Experimental Study of the Hydrodynamics of a Gas-Solid Tapered Fluidized Bed*, Applied Mathematical Modeling, 35, 2265-2278, 2010.
- Secretaría de Energía Argentina, *Energía Renovable - Energía Biomasa*, Argentina, 2008.
- Taghipour, F., Ellis, N. y Wong, C., *Experimental and computational study of gas-solid Fluidized bed hydrodynamics*, Chemical Engineering Science, 60, 6857-6867, 2005.
- Van der Drift, A., Van Doorn, J. y Vermeulen, J., *Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification*, Biomass and Bioenergy, 20(1), 45–56, 2001.
- Van Wachem, B., Schouten, J.C., Van den Bleek, C.M. y Krishna, R., *Eulerian Simulation of Bubbling Behavior in Gas-Solid Fluidized Beds*, Computers & Chemical Engineering, 22 Suppl., S299-S306, 1998.
- Vasquez, S.A. e Ivanov, V.A., *A phase coupled method for solving multiphase problems on unstructured meshes*, ASME, 251, 743-748, 2000.

- Wen, C.Y. y Yu, Y.H., *Mechanics of Fluidization*, The Chemical Engineering Progress Symposium Series, 162, 100-111, 1966.
- Yang, W. C., *Handbook of Fluidization and Fluid-particle Systems*, First ed. Marcel Dekker, Nueva York, 2003.
- Zhang, J. y Zhang, X., *The thermochemical conversion of biomass into biofuels*, Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy, 327–368, 2019.
- Zhang, Y., Wenqi, Z. y Jin B., *Experimental and theoretical study on fluidization of stalk-shaped biomass particle in a fluidized bed*, International Journal of Chemical Reactor Engineering, 9, Art. A54, 2011.