



## **HYBRID MODEL 2D-CFD/3D-DPM FOR SIMULATION OF FLUIDIZED BEDS**

**D. A. García Estrada**, C. F. Cruz Fierro, and J. Pinto Espinoza  
Instituto Tecnológico de Durango

### **ABSTRACT**

Fluidization has been used in variety of applications such as absorption and heterogeneous catalytic reactors. The study of fluidized beds has benefited really from computer simulations of increasing levels of the detail. This research project contributes to the study of particle-fluid systems by creating a program validated according to the experimental evidence.

Most of the CFD-DPM simulations of fluidized beds have been two-dimensional due to their reduced computational cost, compared with the three-dimensional simulations even though the results of 3D simulations have better agreement with the experimental evidence in most cases.

In this research project a simulation code was developed which includes the advantages of the 2D and 3D models by combining the accuracy of the 3D model and the speed of the calculation of the 2D model. This new model is based on two simulation codes previously developed in Fortran, AZTECA modeled as 2D CFD/DPM and Particle-X modeled as 3D CFD/DPM. Of these programs, Particle-X was taken as starting point because it was easier to integrate a continuous phase (fluid) modeled as 2D/CFD.

For the continuous phase, the Navier-Stokes equation, for the  $x$  and  $y$  components were discretized based on the SIMPLE algorithm. The equation of motion of each particle, given by Newton's second Law was integrated with respect to time using the Euler's explicit method.

Each one of 15 sets of experimental data previously obtained was simulated with the codes in 2D, 3D and Hybrid Model 2D/CFD -3D/DPM. Bed heights and the pressure drop from each experiment was compared with the calculated by each simulation code in order to determine in which cases either simulations can be used.

Once validated, model can be used as design tool and for scientific investigation.

### **INTRODUCCIÓN**

La mayoría de los códigos de simulación de lechos fluidizados que emplean el método de partículas discretas (DPM, discrete particle method) manejan un sistema pseudo-bidimensional en el cual el espesor de la columna corresponde exactamente al diámetro de una partícula. Este tipo de modelos ha demostrado ser suficientemente adecuado para describir el comportamiento de lechos fluidizados, pero tiene dificultades para representar adecuadamente la fracción hueca en condiciones cercanas a la mínima fluidización y para manejar distribuciones de

**Proceedings**

tamaño de partículas. Por otro lado, los modelos tridimensionales permiten una representación más precisa del comportamiento de las partículas, pero tienen un alto costo en tiempo de cómputo.

La alternativa propuesta, ejemplificada en la Figura 1, es trabajar con un modelo en el cual el espesor de la columna simulada sea lo suficientemente grande para acomodar un cierto número de partículas (3.5 en este estudio) pero lo suficientemente delgado para justificar el uso de un modelo bidimensional para calcular la hidrodinámica de la fase continua.

De esta forma, se pretende combinar la precisión obtenida en los modelos tridimensionales, con la rapidez de cálculo de los modelos bidimensionales.

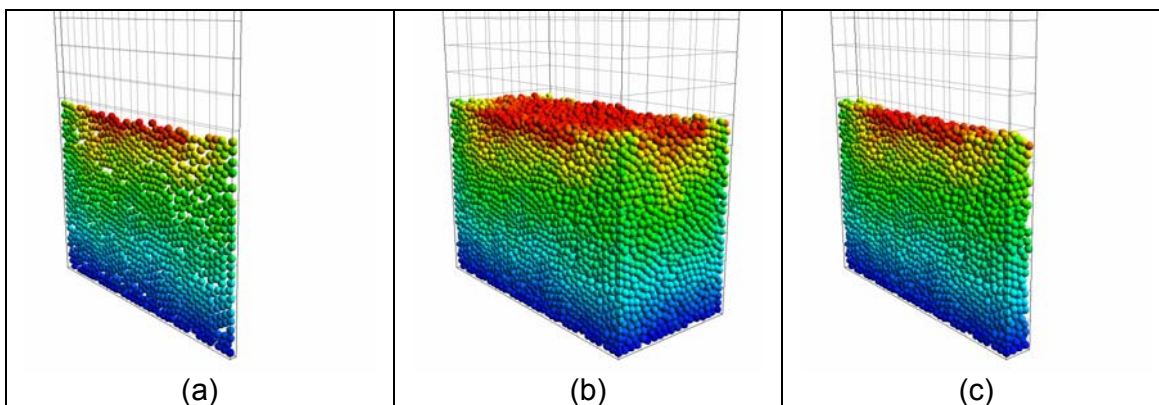


Figura 1. Comparación entre modelos de lechos fluidizados (a) modelo bidimensional; (b) modelo tridimensional, (c) modelo híbrido. Nota: No son resultados reales de simulación.

El objetivo principal de este proyecto de investigación es contribuir al desarrollo de simulaciones de sistemas particulados/fluido. En la etapa de desarrollo, el programa de simulación es refinado y validado de acuerdo a evidencias experimentales. Una vez validado, se convierte en herramienta de diseño y de investigación científica. Como sistema de diseño, se puede utilizar para determinar las condiciones de operación de un lecho fluidizado antes de proceder a realizar pruebas a nivel de planta piloto o escala industrial. El proceso puede ser optimizado de antemano por medio de la simulación, evitando costoso trabajo de laboratorio y planta. Como herramienta de investigación científica, es posible probar la factibilidad de un proceso antes de implementarlo, y permite estudiar el comportamiento de la unidad en condiciones no disponibles normalmente en un laboratorio, por ejemplo los estudios a gravedad reducida conducidos bajo el auspicio de la NASA para el desarrollo de sistemas de soporte vital en misiones espaciales de larga duración (Sornchamni, et al. 2004).



## METODOLOGÍA

Como punto de partida, se trabajó con los dos códigos de simulación de lechos fluidizados previamente desarrollados en lenguaje Fortran:

- AZTECA modelado en 2D CFD/DPM (Pinto-Espinoza, 2002)
- Particle-X modelado en 3D CFD/DPM (Cruz-Fierro, 2005)

El programa Particle-X fue modificado para implementar el modelo híbrido propuesto, ya que sólo fue necesario cambiar el procedimiento de cálculo de la hidrodinámica de la fase continua (fluido) para dos dimensiones.

Se procedió a la realización de una discretización los componentes  $x$  y  $y$  de la ecuación de conservación de momento lineal ecuación de Navier-Stokes (Ecuación 1), para la fase continua, teniendo como resultado un perfil de velocidades bidimensional.

La discretización se realiza para los componentes  $x$  y  $y$ , porque se trabaja en dos dimensiones.

$$\rho_f \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon u) + \rho_f \nabla \cdot (\epsilon u u) + \epsilon \nabla P + \nabla \cdot (\epsilon \tau) - \epsilon \rho_f g - f = 0 \quad (1)$$

Las celdas para la discretización en ambos componentes de la velocidad se muestran en la Figura 2. El objetivo del procedimiento de discretización es transformar la ecuación diferencial parcial (Ecuación 1) en un sistema de ecuaciones lineales para cada componente de la velocidad del fluido, expresada en función de las velocidades en las celdas adyacentes.

La forma discretizada de estos componentes, mostrada en las Ecuaciones 2 y 3, al ser aplicada a cada una de las celdas en el dominio computacional, constituyen un sistema de ecuaciones lineales que es resuelto por el método de Gauss-Seidel con sobre-relajación.

$$a_{x,P} u_{x,P} = a_{x,W} u_{x,W} + a_{x,E} u_{x,E} + a_{x,S} u_{x,S} + a_{x,N} u_{x,N} + b_x \quad (2)$$

$$a_{y,P} u_{y,P} = a_{y,W} u_{y,W} + a_{y,E} u_{y,E} + a_{y,S} u_{y,S} + a_{y,N} u_{y,N} + b_y \quad (3)$$

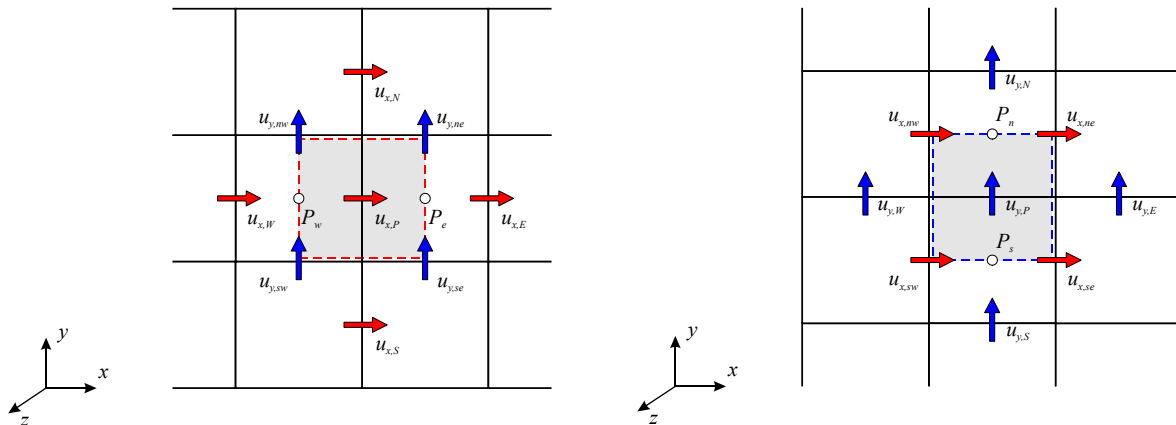


Figura.2. Volumen de control para la discretización para  $x$  y  $y$   
 Figura. adaptada de (Cruz Fierro 2005)

Las velocidades obtenidas, no satisfacen necesariamente la ecuación de continuidad (Ecuación 4), porque la distribución de presión supuesta no es necesariamente la distribución real de la presión. En este caso se realizaron una corrección de presión (Ecuación 5), de modo que las velocidades obtenidas satisfagan esta ecuación. . El volumen de control utilizado para la corrección de presión se muestra en la Figura 3.

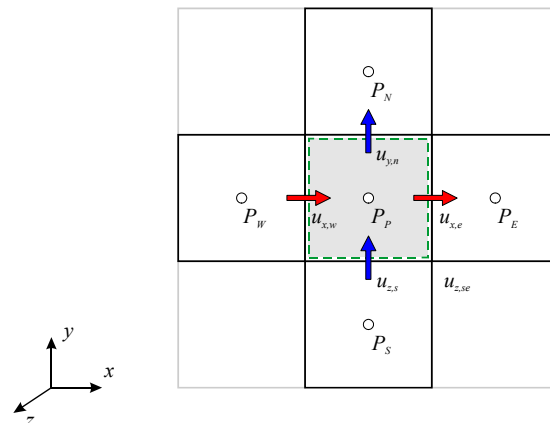


Figura 3. Volumen de control para la corrección de la presión  
 Figura. adaptada de (Cruz Fierro 2005)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon u) = 0 \quad (4)$$

$$P' = P - P^* \quad (5)$$

Usando un total de 15 conjuntos de datos experimentales de caída de presión y/o expansión en lechos fluidizados recopilados por Pinto-Espinoza (2002) y Cruz-Fierro

(2005), se llevaron a cabo simulaciones que duplicaban las condiciones de cada uno de los experimentos, usando AZTECA (2D), Particle-X (3D) y el nuevo modelo híbrido (2D/3D, espesor de columna de  $3.5d_p$ ). El número de partículas en cada simulación se ajustó proporcionalmente al espesor de la columna.

## RESULTADOS

La Figura 4 muestra un conjunto representativo de los datos experimentales de caída de presión, así como los resultados arrojados por cada uno de los tres códigos de simulación. Los datos se obtuvieron en una columna cilíndrica de 0.052 m de diámetro interno, utilizando agua como medio fluidizante a una velocidad superficial de  $1.78 \times 10^{-2}$  m/s, y con partículas de  $1.84 \times 10^{-2}$  kg/m<sup>3</sup>.

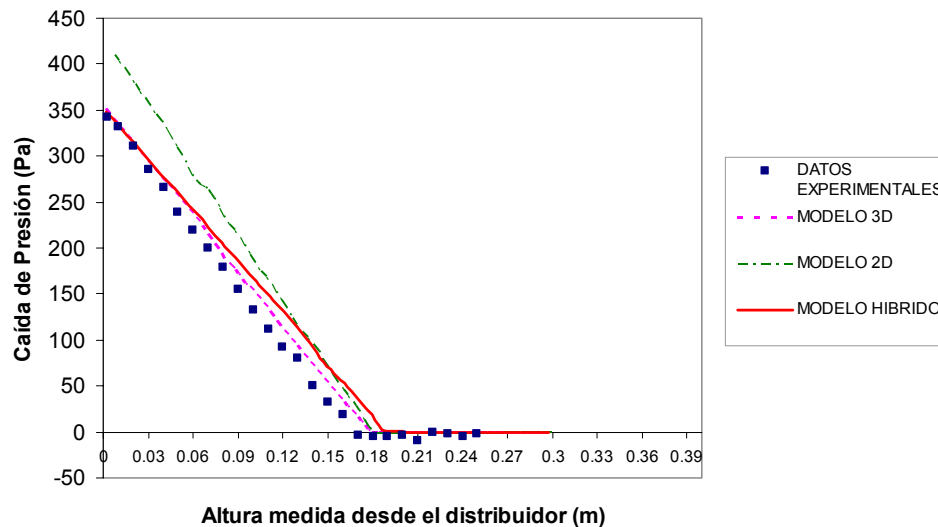


Figura 4. Caída de presión en el lecho fluidizado, comparación entre los datos experimentales (Pinto-Espinoza, 2002) y los resultados de simulación con los tres códigos estudiados.

## CONCLUSIONES

El modelo tridimensional (Particle-X) muestra que es eficiente y preciso ya que es el modelo que más se acerca a la realidad, pero que su carga computacional es muy pesada y por esta razón es menos usada. El modelo bidimensional (AZTECA) se aparta más de los datos experimentales que los modelos Híbrido y Particle-X, pero su carga computacional es menor que la tridimensional por lo que se recurre a este tipo de simulaciones por su reducido tiempo de simulación.

## Proceedings

El efecto de la simulación realizada por el modelo Híbrido 2D-CFD/3D-DPM mostró tener una mejor correspondencia con los resultados obtenidos de los programas existentes en 2 y 3 dimensiones, de la misma manera tuvo una buena correspondencia con las evidencias experimentales.

De este modo se comprueba que la carga computacional de este modelo es menor que la tridimensional y que es tiene más exactitud o confiabilidad que el modelo bidimensional, por lo que es más factible de usar que los modelos prescritos anteriormente.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) (proyecto clave 441.06-P). También se agradece a los doctores Goran N. Jovanovic y Brian P. Reed de la Oregon State University por su colaboración en el desarrollo de los códigos AZTECA y Particle-X.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, T.B. and R. Jackson (1967). "A fluid mechanical description of fluidized beds." I&EC Fundamentals **6**: 527-539
- Cruz-Fierro, C.F. (2005) "Hydrodynamic Effects of Particle Chaining in Liquid-Solid Magnetofluidized Beds: Theory, Experiment, and Simulation". Tesis Doctoral, Chemical Engineering Department, Oregon State University. 5-12, 57-59, 61-69, 73-74, 78, 82-89 pp.
- Pinto-Espinoza, J. (2002) "Dynamic Behavior of Ferromagnetic Particles in a Liquid-Solid Magnetically Assisted Fluidized Bed (MAFB): Theory, Experiment, and CFD-DPM Simulation". Tesis Doctoral, Chemical Engineering Department, Oregon State University. 21-23, 26, 27, 40, 41, 95, 96, 104-118, 120, 127-130, 143-148 pp.
- Sornchamni, T. (2004). Magnetically assisted liquid-solid fluidization in a gradient magnetic field: Theory and application. Tesis Doctoral, Chemical Engineering Department, Oregon State University, 121 pp.