

ESTUDIO DE LA PÉRDIDA DE CARGA Y DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN LECHO FLUIDIZADO BURBUJEANTE MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Andrés Reyes Urrutia^a, Federico Galeazzi^a, Mariana T. Zambon^a, Gilles Flamant^b,
Daniel Gauthier^b y Germán D. Mazza^a

^aDepartamento de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, IDEPA, Buenos Aires 1400, Neuquén (8300), andres.reyes@idepa.gov.ar, <http://www.idepa.gov.ar>

^bLaboratoire PROMES (Centre National de la Recherche Scientifique et Université de Perpignan), 7, Rue du Four Solaire, Odeillo Font-Romeu, Francia, <http://www.promes.cnrs.fr>

Palabras Clave: Lecho fluidizado, transferencia de calor, pérdida de carga.

Resumen. Se utilizó la licencia académica del *software* ANSYS-Fluent 13.0 para simular el comportamiento de una unidad de lecho fluidizado a escala laboratorio instalada en PROMES (*Laboratoire PROCédés Matériaux et Énergie Solaire*), CNRS, Francia. Se llevó a cabo el estudio fluidodinámico del lecho fluidizado bajo diferentes condiciones operativas, típicas de los procesos de incineración de materiales tales como biomasa, carbón, residuos domiciliarios, entre otros.

Se acopló a este estudio el análisis térmico del lecho debido a que resulta necesario el suministro de calor al mismo de manera de lograr una condición térmica adecuada para el desarrollo del proceso de incineración. La temperatura de operación de la unidad fluidizada experimental se mantiene mediante la acción de resistencias de potencia variable ubicadas alrededor de la pared del lecho. Para la fluidización se utiliza aire cuya temperatura de entrada puede seleccionarse mediante la activación de un sistema calefactor secundario.

Las simulaciones se realizaron en un sistema de dos dimensiones con la utilización del modelo multifásico Euleriano, en régimen transitorio. Las partículas se consideraron esféricas, de tamaño uniforme y con las propiedades correspondientes a la arena utilizada en el lecho experimental. Como modelo de arrastre, entre de las alternativas disponibles en el *software*, se seleccionó la función de Gidaspow (D. Gidaspow et.al., Fluidization VII, Proc. 7th Eng. Foundation Conf. Fluidization, 75–82 (1992)). Adicionalmente, para la transferencia de calor entre la fase gaseosa y la fase granular, se utilizó el modelo de Gunn (D. J. Gunn, Int. J. Heat Mass Transfer, 21:467-476 (1978)).

Se presentan los resultados de pérdida de carga del lecho fluidizado para dos condiciones térmicas de operación extremas, 873 y 1123 K. Los datos de pérdida de carga obtenidos a partir de las simulaciones son comparados con el resultado del balance de fuerzas para la condición de mínima fluidización, observándose una buena concordancia.

Adicionalmente se simuló el estado transitorio de arranque del equipo para diferentes condiciones tanto de temperatura de entrada del aire como de flujo de calor a través de la pared de la unidad. Con la finalidad de considerar una eventual mejora o cambio en el dispositivo de suministro de calor, también se realizaron simulaciones con valores de flujo superiores al máximo alcanzable por el dispositivo original. Los transitorios de arranque resultantes son coincidentes con los rangos de tiempo observados en el equipo experimental.

1. INTRODUCCIÓN

El gran volumen de residuos sólidos que se genera a diario en nuestras ciudades constituye un serio problema para el medio ambiente. La incineración es una de las alternativas de importancia creciente en la eliminación de los residuos sólidos urbanos (Werther y Ogada, 1999), ya que permite disminuir su volumen hasta en un 90%.

La incineración en lecho fluidizado, es conocida como incineración limpia debido a que la operación es llevada a cabo a temperaturas relativamente bajas, minimizando la formación de óxidos de nitrógeno a partir del nitrógeno del aire. Así, los NO_x que se producen, provienen únicamente del nitrógeno contenido en el residuo (Horio, 1980). Por otro lado, la capacidad del lecho de homogeneizar su temperatura, permite mantener toda la cámara a una temperatura de combustión comprendida entre 600 °C y 850 °C, lo que garantiza la eliminación de dioxinas y furanos producidos durante la incineración (Castells, 2005).

Estas instalaciones cuentan con un lecho de arena que se mezcla con las partículas del residuo que se desea tratar. En este sistema la arena actúa como un vector transportador de calor, teniendo un rol preponderante en la operación y eficiencia del equipo incinerador. El agente fluidizante utilizado es aire.

Esta tecnología permite la recuperación de la energía de los residuos sólidos como energía eléctrica lo que hace aún más atractivo el proceso de incineración desde el punto de vista económico.

A pesar de los importantes avances logrados sobre los procesos de incineración en las últimas dos décadas, el modelado y la simulación de estos equipos es un campo aun no desarrollado completamente. Para lograr este propósito, un estudio en profundidad de la hidrodinámica del lecho y del comportamiento térmico en particular durante los transitorios de la operación es de gran importancia.

El objetivo de este trabajo comprende el estudio de la fluidodinámica y de los transitorios térmicos de un lecho fluidizado aire-arena con partículas sólidas de tamaño uniforme, a fin de lograr un conocimiento exhaustivo de su comportamiento, para posteriormente acoplar los módulos globales de simulación fluidodinámica y térmica a la combustión en sí (escala local del residuo incinerado).

Las simulaciones por CFD se realizaron sobre la base del equipo experimental del laboratorio PROMES (*Laboratoire PROcédés Matériaux et Énergie Solaire*) de Francia. Esta contribución constituye una primera etapa que permitirá hacer posible la simulación completa del proceso de incineración de residuos sólidos incorporando a la arena las partículas de residuos que combustionan.

Se llevan a cabo las simulaciones empleando la versión académica del software de fluidodinámica computacional ANSYS-Fluent 13.0, basado en el método numérico de los volúmenes finitos (Patankar, 1980).

2. MODELADO NUMÉRICO DE FLUJO MULTIFÁSICO

Existen actualmente dos enfoques para abordar la resolución numérica de flujos multifásicos, denominados Euler-Lagrange y Euler-Euler. En el primer caso, la fase predominante es tratada como un continuo mediante la resolución de la ecuación de Navier-Stokes, mientras que la fase dispersa es resuelta mediante el seguimiento de un gran número de partículas, burbujas o gotas a través del campo de flujo calculado para la primera fase. La fase dispersa puede intercambiar cantidad de movimiento, masa y energía con la otra fase. La condición fundamental sobre la que se sustenta el uso de este enfoque es que la fase secundaria debe ocupar una baja fracción del volumen total del sistema. Con este enfoque es posible realizar un seguimiento de la trayectoria de cada una de las unidades de la fase

dispersa y de los cambios que pueden surgir como consecuencia de la interacción con su entorno. Todo esto hace que el enfoque resulte adecuado para el modelado de los secadores *spray*, combustión de carbón y de combustibles líquidos, flujo de partículas cargadas, pero inadecuado para representar mezclas líquido-líquido, lechos fluidizados o cualquier otra aplicación donde la fracción de volumen de la segunda fase sea importante.

En el segundo enfoque las diferentes fases son tratadas matemáticamente como continuas. Dado que el volumen ocupado por una de las fases puede ser ocupado por las otras, se utiliza el concepto de fracción de volumen y se asume que las fracciones de cada una de las fases presentes son funciones continuas del espacio y del tiempo y que su suma es igual a la unidad.

Las ecuaciones de conservación para cada fase permiten obtener un conjunto con una estructura similar para cada una de ellas. Este conjunto de ecuaciones es resuelto mediante el uso de relaciones constitutivas obtenidas a partir de datos empíricos o en el caso de flujos granulares mediante la aplicación de la teoría cinética (Ansys-Fluent, 2011). De los modelos multifásicos disponibles en el software utilizado, el que mejor se adapta a una aplicación como la que se pretende abordar en el presente trabajo es el denominado Modelo Euler-Euler. Este modelo es el utilizado con mayor frecuencia y el que arroja mejores resultados en la simulación de lechos fluidizados gas-sólido (Pain et al., 2001).

Taghipour et al. (2005) investigaron, tanto experimental como computacionalmente, la hidrodinámica de un lecho de partículas Geldart B de TiO_2 , fluidizado con aire. En la simulación 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.

Hosseini et al. (2010) para lechos fluidizados gas-sólido y Cornelissen et al. (2007) para lechos sólido-líquido, reportan simulaciones utilizando el enfoque euleriano cuyos resultados mostraron una muy buena concordancia con los datos experimentales.

Duarte et al. (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 et al. (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 cómputo, manteniendo la precisión. Con respecto a las simulaciones 2D axisimétricas, los autores observaron cierta subestimación de la fracción volumétrica del sólido en el centro de la columna del lecho.

En base a la síntesis que antecede, en este trabajo se decidió adoptar el enfoque euleriano (modelo Euler-Euler) y desarrollar las simulaciones adoptando una geometría bidimensional para representar el lecho fluidizado.

2.1 Modelo Euler-Euler

2.1.1 Definición de fracción volumétrica

Como se ha mencionado, el uso del enfoque multifásico de Euler requiere la incorporación del concepto de fracción de volumen. Para el caso de la fase genérica q , su volumen está dado por:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (1)$$

y la condición que se debe cumplir es:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

En el caso específico de un lecho fluidizado, la fracción volumétrica carente de material sólido es denominada fracción porosa o simplemente porosidad (comúnmente denotada como ε).

La densidad efectiva de la fase q depende de la densidad física de la misma ρ_q :

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

2.1.2 Ecuaciones de conservación

Para el caso en estudio, se cuenta con dos fases, una sólida granular a la que denotaremos con la letra s (que el *software* interpreta como fase secundaria) y una fase gaseosa, el aire (la fase primaria) a la que nos referiremos con la letra g .

2.1.2.1 Conservación de masa

La ecuación de continuidad para la fase genérica q es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (4)$$

2.1.2.2 Conservación de cantidad de movimiento

El balance de cantidad de movimiento para la fase q que interacciona con otra fase p es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} \quad (5)$$

La Ec. (5) es resuelta con el uso de expresiones adecuadas para las fuerzas en la interfase \vec{R}_{pq} . Esta fuerza depende de la fricción, presión, cohesión, entre otros factores, y debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\vec{R}_{pq} = \vec{R}_{qp} \quad (6)$$

$$\vec{R}_{qq} = 0 \quad (7)$$

El *software* resuelve esa fuerza de interacción de la manera que se muestra a continuación:

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (8)$$

donde K_{pq} es el coeficiente de intercambio de cantidad de movimiento en la interfase, que para un sistema como el que se ha estudiado, en el que interactúa un sólido granular (s) con el aire (g) se calcula según la Ec. (9):

$$K_{sg} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (9)$$

donde f es un factor que depende del modelo adoptado para resolver el intercambio de cantidad de movimiento en la interfase, y τ_s es el tiempo de relajación para un conjunto de partículas dado por:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_g} \quad (10)$$

Todas las definiciones de f incluyen una función de arrastre (C_D) que depende del número de Reynolds de las partículas presentes en la fase sólida de Re_s :

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (11)$$

En este trabajo se ha utilizado el modelo de arrastre de Gidaspow et al. (1992) por ser el que mejor se adapta al caso en estudio (ANSYS-Fluent, 2011). Este modelo consiste en una combinación del modelo de Wen y Yu (1966) y la ecuación de Ergun (1952). Se llevó a cabo una validación de la aplicación de este modelo de arrastre para el par aire-arena y los resultados obtenidos se presentan en la sección 4.1.

En el modelo Gidaspow, cuando la fracción de volumen del gas es mayor que 0,8, el coeficiente de intercambio presenta la siguiente forma:

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2,65} \quad (12)$$

con

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_g Re_s)^{0,687} \right] \quad (13)$$

En el caso en que $\alpha_g \leq 0,8$, resulta

$$K_{sg} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_g) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_g \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad (14)$$

siendo ésta la ecuación que el *software* utiliza en la resolución del problema que aquí se plantea.

2.1.2.3 Conservación de la Energía

Para describir la conservación de la energía en las aplicaciones del modelo multifásico de Euler, la ecuación de entalpía para cada fase puede escribirse en forma genérica de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q + Q_{pq} \quad (15)$$

El intercambio de calor entre las fases debe cumplir que:

$$Q_{pq} = -Q_{qp} \quad \text{y} \quad Q_{qq} = 0 \quad (16)$$

Q_{pq} se asume como una función de la diferencia de temperatura entre fases:

$$Q_{pq} = h_{pq} (T_p - T_q) \quad (17)$$

Para el caso que aquí se presenta, el coeficiente de transferencia de calor convectivo se relaciona con el número de Nusselt mediante:

$$h_{gs} = \frac{6k_g \alpha_s \alpha_g Nu_{gs}}{d_s^2} \quad (18)$$

En la determinación del número de Nusselt para flujo granular (en el que $p = s$), ANSYS-Fluent propone, entre otras alternativas, la correlación de Gunn (1978), aplicable en un amplio rango de porosidad del lecho (0,35 a 1,0) y con números de Reynolds de hasta 10^5 . La correlación referida predice el coeficiente de transferencia de calor para un lecho fijo y particularmente para lechos fluidizados:

$$Nu_{gs} = (7 - 10\alpha_g + 5\alpha_g^2)(1 + 0,7Re_s^{0,2}Pr^{1/3}) + (1,33 - 2,4\alpha_g + 1,2\alpha_g^2)Re_s^{0,7}Pr_g^{1/3} \quad (19)$$

Wakao *et al.* (1979) propusieron una correlación basada en datos de lechos fijos corregidos para la dispersión térmica radial para evaluar el Nu_{gs} .

$$Nu_{gs} = 2 + 1,1 Re_s^{0,6} Pr_g^{1/3}, \quad Re_s > 15 \quad (20)$$

Esta correlación fue ampliamente validada y es aplicable a este caso, como lo muestra Davidson *et al.* (1985). Si bien la correlación de Wakao no está disponible en el menú de Fluent, Davidson también demostró una excelente concordancia de sus resultados con los evaluados por la correlación de Gunn, permitiendo entonces, seleccionar a ésta última en nuestros cálculos.

2.1.3 Influencia de la temperatura en el comportamiento fluidodinámico de una unidad fluidizada

El efecto de la temperatura en el comportamiento de las variables asociadas a la fluidodinámica de un lecho fluidizado ha sido ampliamente estudiado (Kunii y Levenspiel, 1990). Se han realizado varios estudios que indican cómo son afectadas las variables de un lecho fluidizado ante cambios en la presión y la temperatura de operación. Algunas observaciones (Kunii y Levenspiel, 1990) con respecto a la influencia de la temperatura para lechos con polvo de carbón poroso, carbón y cristales de tamaño uniforme son las siguientes:

- ε_{mf} aumenta (hasta un 8%) con la temperatura para partículas pequeñas ($d_p < 0,1\text{mm}$) cuando la operación se conduce a temperaturas de hasta $500\text{ }^\circ\text{C}$ y no se ve afectada para partículas de mayor tamaño.
- A altas temperaturas, u_{mf} puede ser calculada con las ecuaciones disponibles en la bibliografía para lechos a temperatura ambiente, incluso para partículas pequeñas, si se ha corregido previamente ε_{mf} .

Estas conclusiones también fueron observadas por Formisani *et al.* (1997), quienes realizaron experiencias en el rango de temperaturas que va desde temperatura ambiente hasta $800\text{ }^\circ\text{C}$ con arena, en un amplio rango de tamaños, llegando a conclusiones similares a las ya expuestas para partículas del tamaño considerado en este trabajo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones y que el tamaño promedio de las partículas de arena utilizadas es de $0,7\text{ mm}$ se puede afirmar que el efecto de la temperatura del lecho en el comportamiento fluidodinámico no requiere la modificación en las ecuaciones predictivas de las variables fundamentales ε_{mf} y u_{mf} .

3. SIMULACIÓN POR CFD. CONDICIONES OPERATIVAS, INICIALES Y DE CONTORNO UTILIZADAS.

3.1 Descripción del lecho fluidizado

Las simulaciones se realizan con el objeto de estudiar el funcionamiento del lecho experimental instalado en PROMES-CNRS, Francia, que se muestra en la Fig. 1. Se trata de un lecho fluidizado de acero inoxidable 316L resistente a altas temperaturas y a ácidos débiles con un espesor de pared de 4,5 mm. La zona de reacción (que ha sido simulada en este trabajo) tiene un diámetro interno de 0,1056 m, y una altura de la zona de reacción de 0,395 m. La base del reactor está conformada por una rejilla de acero que tiene un espesor de 6 mm y una porosidad del 45% (242 agujeros de 2 mm de diámetro).



Figura 1: Reactor utilizado en PROMES, Francia.

El estudio comprende dos aspectos, el análisis del comportamiento fluidodinámico del lecho fluidizado que se realiza a temperatura constante y el estudio térmico que incorpora la transferencia de calor a través de las paredes del lecho con el objeto de analizar el proceso transitorio de puesta en marcha del equipo.

El suministro de calor en el equipo experimental incluye dos aportes:

a. Pre calentamiento del gas de fluidización: El gas de fluidización es precalentado por medio de dos elementos resistivos OSRAM en serie (T : 540 °C, ϕ_e : 43 mm, ϕ_i : 31,8 mm, largo 287 mm, P_{max} : 6 KW, V_{max} : 220 V, I_{max} : 27,3 A) con lo que se podría alcanzar una máxima temperatura teórica de 900 °C. El control de temperatura está asegurado por un controlador PID.

b. Suministro directo de calor al reactor: Es posible elevar, y de ser necesario mantener, la temperatura del reactor mediante el suministro de calor a través del uso de dos módulos SUPERTHAL SHC 150 V de KANTHAL (ϕ_e : 350mm, ϕ_i : 135 mm, largo total 200 mm, 150 mm de largo para la sección de calentamiento, resistencia de 0.85 Ω , T_{max} : 1600 °C, I_{max} : 75 A).

La Fig. 2 muestra un esquema del reactor además de la posición de ambos sistemas de suministro de calor.

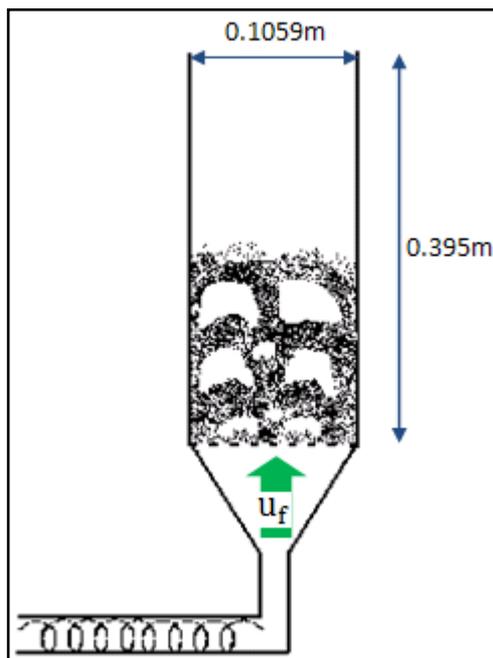


Figura 2: Esquema de reactor

3.2 Descripción de las simulaciones realizadas

El lecho simulado está constituido por 1,6 kg de arena cuyas partículas presentan un diámetro medio de 0,7 mm. Las propiedades físicas de dicho material que resultan relevantes para las simulaciones se encuentran citadas en la Tabla 1. Para el aire, las propiedades físicas y termodinámicas fueron resueltas introduciendo en el *software* polinomios en función de la temperatura.

ρ_s (kg. m ⁻³)	2670
C_{ps} (J. kg ⁻¹ . K ⁻¹)	845
k_s (W. m ⁻¹ . K ⁻¹)	1,9

Tabla 1: Propiedades físicas de la arena fluidizada

En la fluidización del lecho a escala de laboratorio se utilizan diferentes condiciones operativas tanto de temperatura del lecho como de velocidad de entrada del aire de fluidización.

En las simulaciones correspondientes al estudio fluidodinámico se trabajó bajo las condiciones térmicas de menor y mayor temperatura alcanzables en las experiencias de laboratorio (873 K y 1123 K) y se simularon velocidades del fluido comprendidas entre 0,17 y 1,5 m/s.

Con respecto al estudio térmico del lecho, la Tabla 2 muestra, para las dos condiciones operativas estudiadas, las velocidades mínimas de fluidización, las velocidades superficiales del gas y las temperaturas de ingreso de gas al lecho.

La velocidad superficial del aire a la entrada del reactor se toma igual a $3u_{mf}$ y el valor de este último parámetro ha sido calculado mediante la correlación formulada por **Kunii y Levenspiel (1990)**:

$$u_{mf} = \frac{d_s^2(\rho_s - \rho_g)g}{1650\mu_g} \quad (21)$$

T_{op} (K)	u_{mf} (m.s ⁻¹)	u_f (m.s ⁻¹)	T_{aire} (K)
873 K	0,2	0,6	873
1123 K	0,17	0,51	1123

Tabla 2: Condiciones de operación utilizadas en las simulaciones

En la **Tabla 3** se muestran los valores de temperatura y velocidad superficial del aire así como los flujos de calor utilizados en las simulaciones para los transitorios de arranque del lecho. El máximo valor del flujo de calor alcanzable con el dispositivo experimental es q_3 mientras que q_4 (ver **Tabla 3**) se ha evaluado en vistas de la posibilidad de cambiar o mejorar la fuente de suministro de energía.

T_{aire} (K)	u_f (m.s ⁻¹)	q_1 (W.m ⁻²)	q_2 (W.m ⁻²)	q_3 (W.m ⁻²)	q_4 (W.m ⁻²)
873	0,6	-----	75.000	90.000	180.000
1123	0,51	10.000	75.000	90.000	180.000

Tabla 3: Condiciones de borde utilizadas en las simulaciones

Las condiciones iniciales de las simulaciones realizadas se detallan a continuación:

- **Evaluación de pérdida de carga de la unidad fluidizada a la temperatura de operación:** las simulaciones se inician con el sólido en reposo, a la temperatura de operación, con una porosidad de 0,44 y con una altura de 0,145 m. Las temperaturas de la pared del reactor, del lecho de partículas de arena, y del aire de fluidización coinciden con la temperatura de operación. A partir de estas condiciones se simulan los primeros 10 segundos de fluidización para distintas velocidades superficiales del aire. Debido al comportamiento oscilante de la variable ΔP , para cada velocidad se informa un valor promedio de pérdida de carga calculado a partir de datos comprendidos entre los 3 y los 10 segundos.
- **Análisis de los transitorios de arranque:** las simulaciones se inician con el sólido en reposo, con una porosidad de lecho 0,44 a la temperatura ambiente de 293 K y con una altura inicial de 0,145 m. El flujo de calor atraviesa las paredes del lecho mientras es fluidizado con aire en las condiciones expuestas en la **Tabla 2**. Las simulaciones transcurren hasta que las condiciones térmicas de operación son alcanzadas. En este punto el flujo de calor es llevado a valor cero y se da por concluida la simulación luego de unos pocos segundos en los que dicha condición se mantiene.

Todas las simulaciones se llevaron a cabo en estado transitorio, adoptándose un paso de tiempo de 0.001 segundos, con 20 iteraciones por paso. Como se mencionó con anterioridad, el modelo multifásico euleriano que incorpora la teoría cinética granular para describir el

comportamiento del sistema bifásico fue aplicado. Se ha utilizado el método de resolución *Pressure based*, utilizando doble precisión y discretizaciones de primer orden.

Las simulaciones se desarrollaron en un equipo Intel Core I7, con procesadores de 3.40 GHz de velocidad y 8 GB de memoria RAM. El tiempo de cómputo requerido fue de aproximadamente 24 hs para cada velocidad del aire evaluada en el cálculo de la pérdida de carga, y de alrededor de 15 días (el tiempo varía con el flujo de calor suministrado) para cada flujo de calor fijado con el objeto de evaluar el transitorio de puesta en marcha.

En la Tabla 4 se resumen las ecuaciones utilizadas para calcular las propiedades del aire, los principales parámetros de la simulación por CFD.

Descripción	Valor	Comentario
Conductividad del aire (W/mk)	$k_g = -7E-9T^2 + 7e-5T + 0,0063$	Aire
Densidad del gas	$\rho_g = 2E-12T^4 - 9E-09T^3 + 1E-05T^2 - 0,009T + 2,9187$	Aire
Viscosidad del gas	$\mu_g = 4E-08T + 6E-06$	Aire
$C_{p_g} (J.kg^{-1}.K^{-1})$	$C_{p_g} = 0,2046T + 930,18$	
Diámetro medio de partícula	0,7 mm	Arena
Coefficiente de restitución	0,9	
Fración volumétrica inicial del sólido	0,56	Lecho Fijo
Velocidades superficiales del gas	0,17 a 1,5 m.s ⁻¹	
Altura inicial del lecho	0,145 m	
Paso de tiempo	0,001 s	
Máx. número de iteraciones por paso	20	
Criterio de convergencia	10 ⁻³	

Tabla 4: Propiedades del fluido, parámetros de la simulación

Las funciones polinómicas utilizadas para calcular las propiedades del aire fueron regresionadas a partir de los valores obtenidos por medio del software Aspen HYSYS, para distintas temperaturas.

3.3 Malla utilizada

Es importante garantizar que la solución obtenida en las simulaciones es independiente de la malla. El método estándar para probar la independencia de la misma consiste en incrementar su resolución (en un factor de dos en todas las direcciones de ser posible) y repetir la simulación. Si los resultados no cambian de manera considerable, es probable que la malla original sea adecuada. Si, por otro lado, surgen diferencias importantes entre las dos soluciones, la malla original es quizá de resolución inadecuada. En este caso debe probarse una malla más fina hasta que se resuelva de manera satisfactoria (Cengel y Cimbala, 2006).

La geometría del sistema estudiado es abordada utilizando un mallado estructurado, en dos dimensiones, con celdas rectangulares.

Para poder encontrar el tamaño óptimo de la malla, siguiendo los lineamientos citados con anterioridad, se efectuaron simulaciones con mallas de distinta densidad, enfocando la atención en los cambios de una variable de interés como es la pérdida de carga. La malla seleccionada se muestra en la Fig. 3. La base de esta geometría está dividida en veinte elementos mientras que su altura consta de doscientas divisiones dando un total de 10.000 elementos. También, en la misma Fig. 3 se han esquematizado las condiciones de borde adoptadas en las simulaciones además de la altura inicial del lecho de arena.

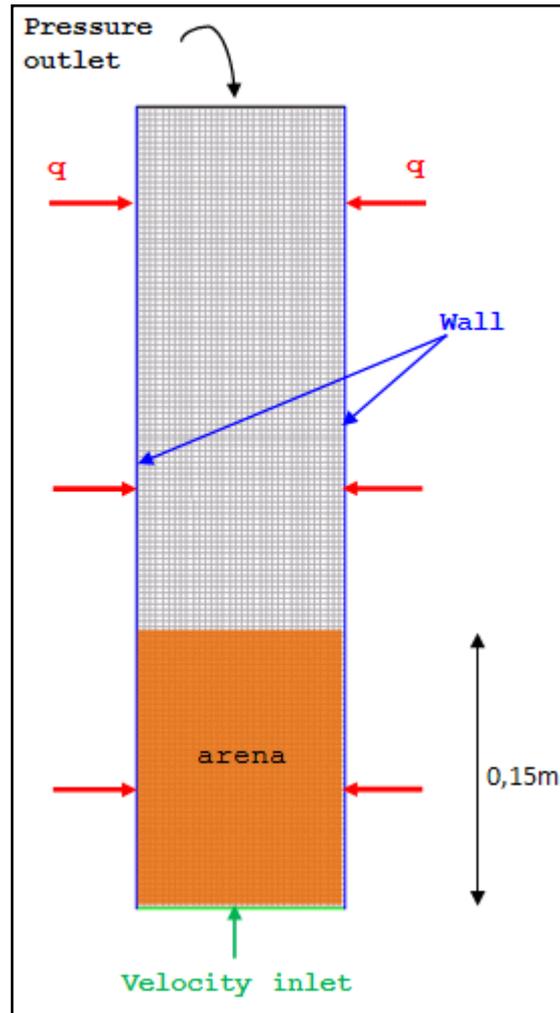


Figura 3: Malla y condiciones de borde adoptadas en la simulación

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Validación del modelo de arrastre

Los modelos de arrastre alternativos disponibles en el software ANSYS-Fluent son los siguientes: Symlal O'Brien, Gidaspow y Wen-Yu. Como se explicó en la sección 2.1.2.2, se optó por la aplicación del modelo de Gidaspow.

A los efectos de validar su utilización, se realizaron simulaciones para un lecho fluidizado aire-arena operando a temperatura ambiente, con velocidades superficiales del aire comprendidas entre 0,1 y 1 m/s, cuyos valores experimentales de pérdida de carga fueron presentados por Barreira (2007). Las características geométricas del lecho experimental utilizado son muy similares a las del caso en estudio (diámetro del lecho: 0,15 m; altura del lecho en reposo: 0,15 m; diámetro medio del sólido (arena): 0,7 mm).

En la Fig. 4 se presentan los resultados de ΔP obtenidos por CFD conjuntamente con los valores experimentales. Puede observarse una muy buena concordancia para velocidades inferiores a 0,7 m/s. Para velocidades superiores, los datos experimentales presentan un aumento que Barreira (2007) atribuye a la presencia de flujo *slug* que puede alterar las mediciones, mientras que los valores calculados se mantienen prácticamente constantes tal como se espera.

Esta experiencia permite confirmar que el modelo de Gidaspow es adecuado para modelar la fluidodinámica de un lecho fluidizado aire-arena correctamente.

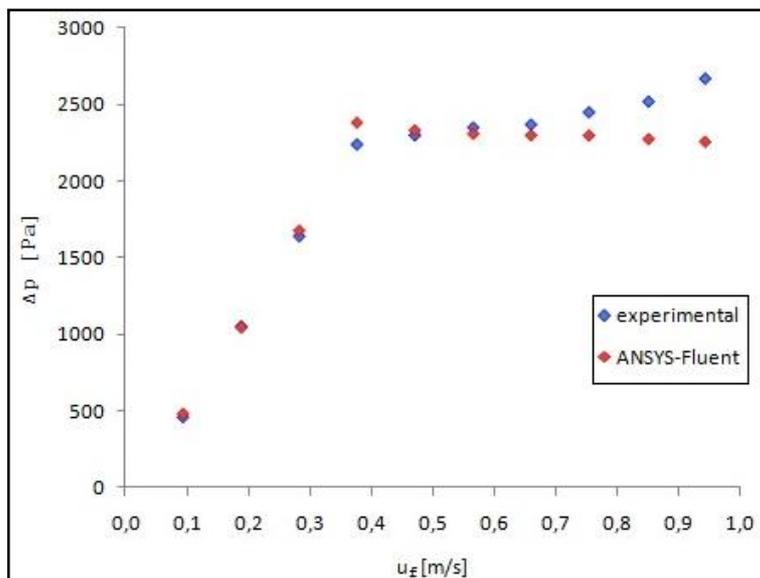


Figura 4: Comparación de datos experimentales con los obtenidos por simulación con CFD.

4.2 Velocidad mínima de fluidización

Sobre la base de las simulaciones realizadas es posible analizar la evolución del lecho a partir de la situación de lecho en reposo, pasando por condición de mínima fluidización y llegando a la fluidización en régimen burbujeante, como consecuencia del incremento gradual de la velocidad superficial del gas. Para cada velocidad superficial del gas, se debió efectuar una simulación en estado transitorio del lecho fluidizado. Este análisis se realizó a la temperatura de operación de 1123 K.

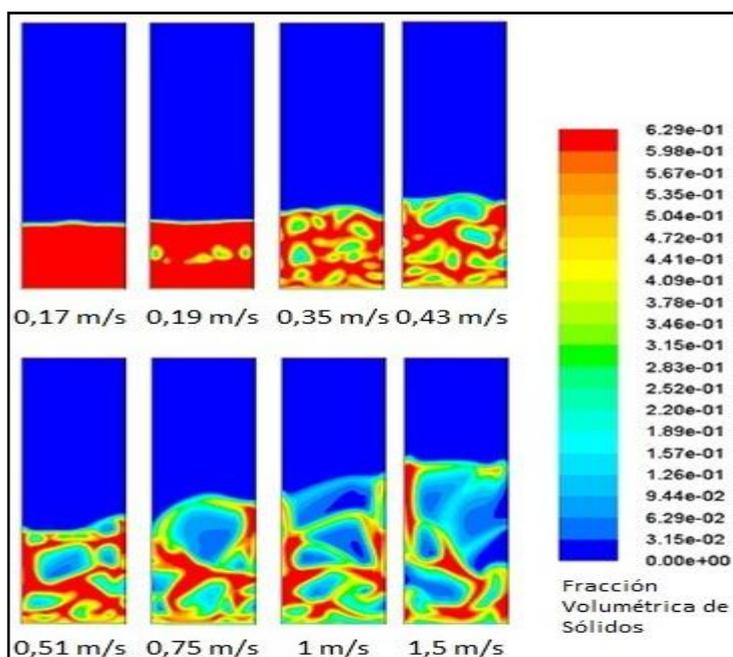


Figura 5: Contornos para la fracción volumétrica de la fase sólida a la condición de operación de temperatura máxima para distintas velocidades del gas

En la Fig. 5 pueden observarse los diagramas de contorno de las fracciones volumétricas del sólido para las velocidades analizadas.

Puede observarse que la expansión del lecho, que caracteriza al fenómeno de mínima fluidización, se produce a velocidades comprendidas entre 0,17 y 0,19 m/s, coincidentemente con el valor calculado a partir de la Ec. (21). También es posible observar la aparición de las primeras burbujas, su aumento de tamaño con el incremento de la velocidad del aire y la expansión experimentada por el lecho en consecuencia.

4.3 Pérdida de carga

En la Fig. 6 se presentan los valores de pérdida de carga a través del lecho obtenidos por CFD en función de las velocidades superficiales del aire. Se simuló el rango completo de velocidades de interés a la temperatura de operación de 1123 K y con el objeto de confirmar la independencia del valor de la pérdida de carga con la temperatura se efectuaron dos simulaciones a una temperatura inferior de operación de 873 K.

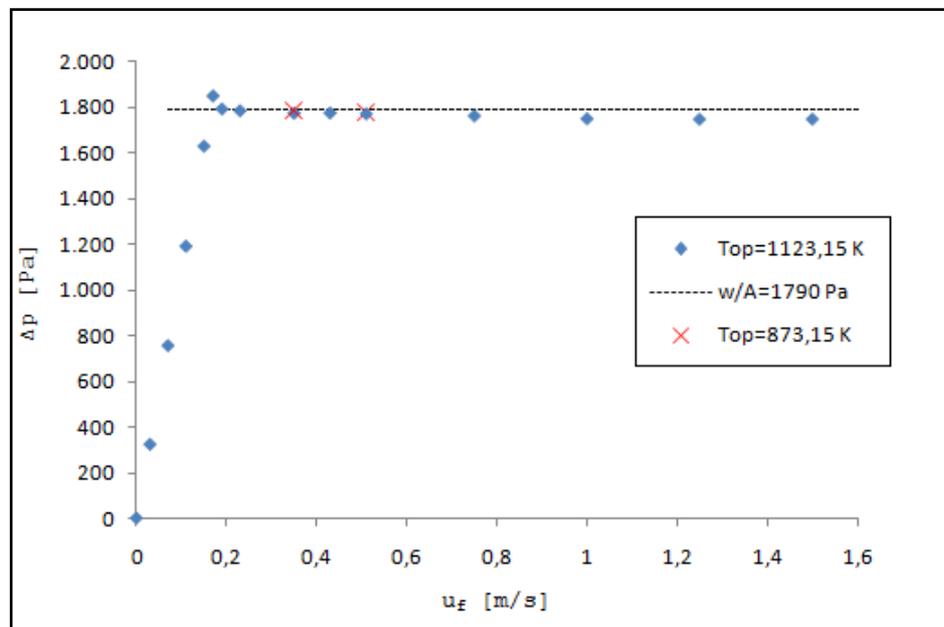


Figura 6: Comparación entre el valor de pérdida de carga teórico w/A y los obtenidos por las simulaciones efectuadas a diferentes condiciones de operación en función de la velocidad superficial u_f .

En los valores de pérdida de carga calculados por ANSYS-Fluent se observan importantes fluctuaciones que concuerdan con las mediciones experimentales de esta variable (Acosta-Iborra et al., 2011). Para realizar la evaluación de la pérdida de carga, en cada simulación se descartaron los primeros tres segundos (lapso en el que se observan importantes oscilaciones) siguiendo la recomendación de Asegehegn (2011). Los valores graficados en la Fig. 7, en donde puede apreciarse este comportamiento de ΔP , característico de los lechos fluidizados, corresponden al período comprendido entre 3 y 10 segundos y a una velocidad del aire de 0,51 m/s.

Los valores obtenidos a partir de las simulaciones son comparados en la Fig. 6 con el valor que resulta de la relación $\Delta p = w/A = 1790$ Pa, donde w es el peso del lecho fijo y A el área transversal al flujo (Kunii y Levenspiel, 1990).

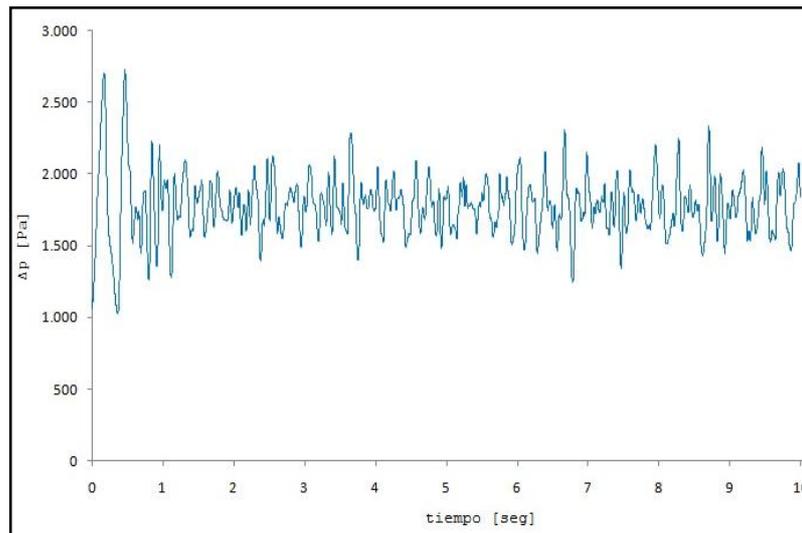


Figura 7: Pérdida de carga del lecho a la temperatura de operación máxima y $u_f = 0,51$ m/s

A partir de este análisis puede afirmarse que el software ANSYS-Fluent permite representar de forma precisa la pérdida de carga a través del lecho aire-arena para las condiciones analizadas.

En la Fig. 8 se muestran los contornos de fracción volumétrica del sólido para la velocidad de fluidización del aire de 0,51 m/s y la temperatura de operación de 1123 K, partiendo del lecho en reposo y hasta alcanzar los 3.02 segundos.

En la primera etapa de la fluidización del lecho, a partir de su estado de reposo, se observan grandes cambios en la altura y en la conformación del lecho. Una vez transcurridos los primeros 3 segundos el lecho alcanza la altura y el patrón de flujo característicos de un lecho con burbujeo con comportamiento macroscópicamente pseudostacionario, como puede apreciarse en la Fig. 8.

Este comportamiento explica las grandes oscilaciones de la pérdida de carga observadas en los primeros segundos de las simulaciones implementadas y confirma la importancia de descartar el primer período de cada simulación en el cálculo de las variables de interés.

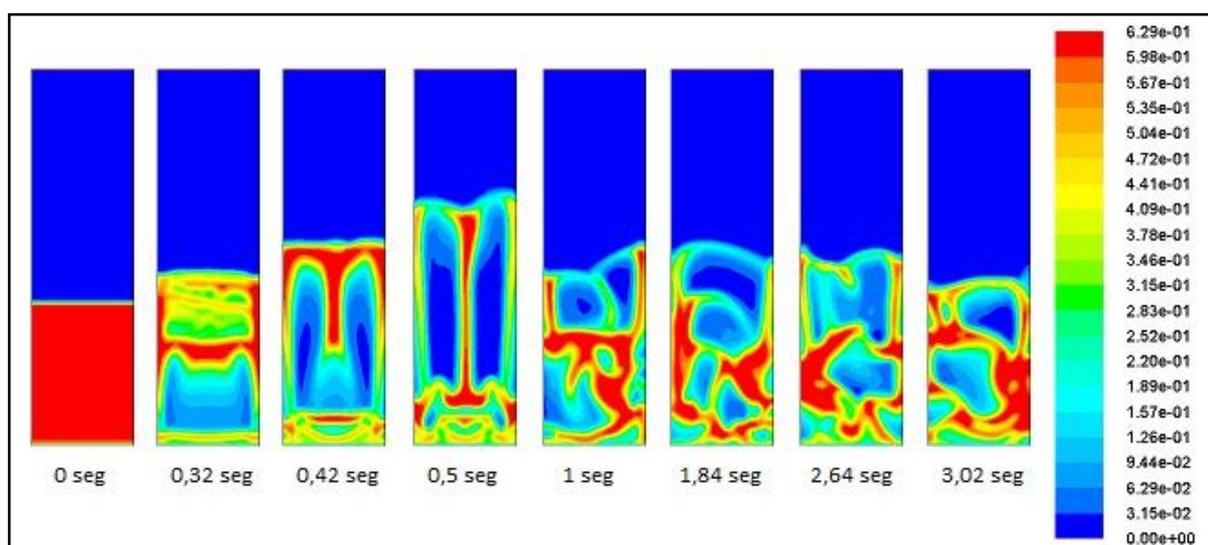


Figura 8: Contornos de fracción volumétrica del sólido para la velocidad del gas $u_f = 0.51$ m/s y a la temperatura de 1123 K

4.4 Análisis térmico del lecho

Las Figs. 9 y 10 presentan los resultados de las simulaciones de los estados transitorios de arranque del lecho fluidizado hasta alcanzar las condiciones térmicas de operación extremas, mínima y máxima, mostradas en la Tabla 2, respectivamente.

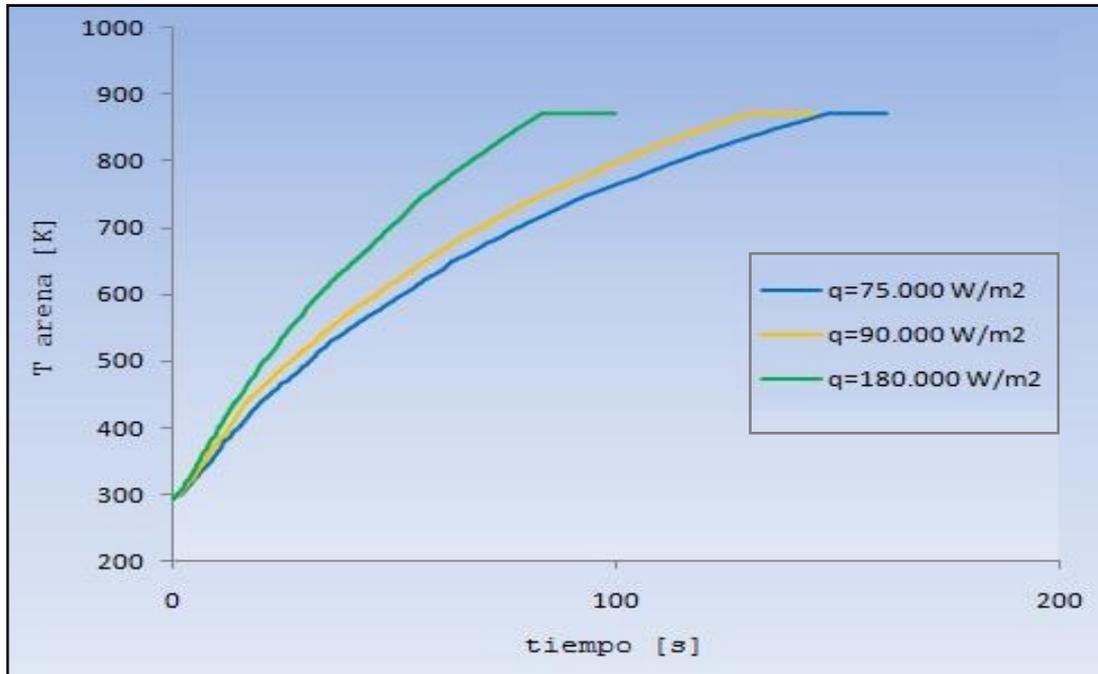


Figura 9: Evolución temporal de la temperatura del sólido fluidizado para alcanzar la temperatura de operación de 873 K utilizando distintos flujos de calor en la pared

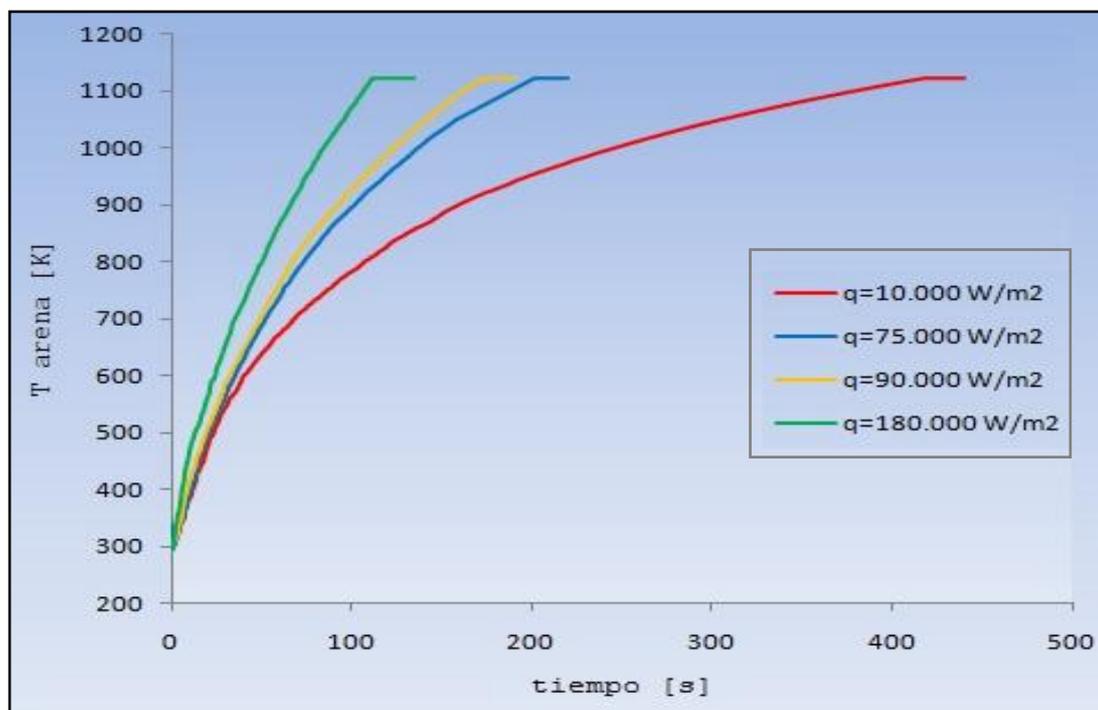


Figura 10: Evolución temporal de la temperatura del sólido fluidizado para alcanzar la temperatura de operación de 1123 K utilizando distintos flujos de calor en la pared

Las curvas muestran la evolución de la temperatura de la arena, inicialmente a 293 K, hasta alcanzar finalmente la condición térmica de operación (en la que coinciden las temperaturas de la arena y el aire). Es importante recordar que el suministro de calor a través de la pared es anulado una vez que se ha alcanzado la temperatura de operación.

La pendiente de las curvas se incrementa marcadamente con el aumento del flujo de calor y puede observarse que el período de puesta en régimen de la operación abarca períodos comprendidos entre los 100 y los 900 segundos, según el flujo de calor empleado. Los valores calculados de tiempo son coincidentes con los rangos obtenidos en el equipo experimental (Falcoz, 2008).

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado el estudio fluidodinámico de un lecho que opera en régimen burbujeante, por fluidodinámica computacional. El sistema estudiado utiliza partículas de arena tipo B en la clasificación de Geldart.

El estudio se centra en el análisis exhaustivo de la capacidad del software ANSYS-Fluent para evaluar las diferentes magnitudes que resultan imprescindibles para determinar el comportamiento fluidodinámico del lecho: velocidad de mínima fluidización y pérdida de carga. A tal fin, el comportamiento de los modelos de arrastre es crítico, y ha sido puesto en cuestionamiento por diferentes especialistas en relación a la programación estándar del software Fluent.

Se aplicó el modelo de arrastre de Gidaspow, cuya validación se realizó en este trabajo comparando los valores de ΔP obtenidos experimentalmente por Barreira (2007) para el par aire-arena a temperatura ambiente, con los resultados de simulaciones efectuadas bajo las mismas condiciones. Los resultados obtenidos confirman la capacidad de este modelo de arrastre para representar el comportamiento fluidodinámico del lecho en estudio.

La velocidad de mínima fluidización se determinó mediante observaciones progresivas de diagramas de contorno referidos a la fracción volumétrica del sólido, y su evolución con la velocidad de fluidización, u_f . La aparición de zonas donde las partículas comienzan a separarse efectivamente es indicativa del incremento de su movilidad y, consecuentemente, de la fluidización inminente. El resultado es satisfactorio y coincide con correlaciones existentes en bibliografía. Ello es importante para el tratamiento posterior de la simulación completa del proceso de incineración en el contexto de CFD por ANSYS-Fluent.

La pérdida de carga en las simulaciones mostró un comportamiento oscilatorio con el tiempo, coincidente con las observaciones experimentales reportadas en la bibliografía. El tratamiento de la información, con el fin de calcular el promedio de la variable, arrojó una buena concordancia con el cálculo teórico.

Con respecto al análisis térmico preliminar del lecho, se realizaron las simulaciones de la unidad en condiciones de alta exigencia para la transferencia de calor, respondiendo el cálculo a las tendencias observadas experimentalmente en relación al tiempo empleado para alcanzar estados estables.

El trabajo realizado muestra que el software ANSYS-Fluent es apto para simular el comportamiento de un sistema fluidizado a alta temperatura y que podrá acoplarse a programaciones locales de partículas incineradas para la modelización de incineradores fluidizados en forma confiable.

RECONOCIMIENTOS

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

NOMENCLATURA

A	área del lecho transversal al flujo, m^2
C_D	función de arrastre, (adimensional)
C_p	capacidad calorífica, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
d_s	diámetro de las partículas de la fase sólida, m
f	relación entre K_{pq} y la función de arrastre, (adimensional)
h_q	entalpía específica de la fase q, $J.kg^{-1}$
h_{pq}	coeficiente de transferencia de calor entre la fase p y la fase q, $W.m^{-2}.°C^{-1}$
I_{max}	corriente máxima, A
K_{pq}	coeficiente de intercambio de cantidad de movimiento en la interfase p-q, $kg.s^{-1}$
k	conductividad térmica, $W.m^{-1}.K^{-1}$
q_i	flujo de calor en la pared del reactor, $W.m^{-2}$
\vec{q}_q	flujo de calor a través de la fase q, $W.m^{-2}$
P_{max}	potencia máxima, kW
$Pr_g = Cp_g\mu_g/k_g$	número de Prandtl, (adimensional)
Q_{pq}	intensidad de la transferencia de calor entre las fases p y q, $J.s^{-1}$
\vec{R}_{pq}	fuerzas en la interfase p-q, $kg.m.s^{-2}$
\vec{R}_{qp}	fuerzas en la interfase q-p, $kg.m.s^{-2}$
\vec{R}_{qq}	fuerzas en la interfase q-q, $kg.m.s^{-2}$
Re_s	número de Reynolds de partícula, (adimensional)
S_q	término fuente para incluir aportes adicionales de entalpía a la fase q, $J.s^{-1}$
T_{aire}	temperatura del aire de fluidización a la entrada del reactor, K
T_{arena}	temperatura del sólido fluidizado, K
T_{op}	temperatura de operación del lecho fluidizado, K
u_f	velocidad superficial del aire, $m.s^{-1}$
u_{mf}	velocidad de mínima fluidización, $m.s^{-1}$
u_t	velocidad terminal, $m.s^{-1}$
\vec{v}	velocidad de fase, $m.s^{-1}$
V_{max}	tensión máxima, V
V_q	volumen del lecho ocupado por una fase genérica q, m^3
w	peso de la masa de arena contenida en el lecho, kg

Símbolos griegos

α	fracción volumétrica de fase, (adimensional)
ε	porosidad del lecho fluidizado, (adimensional)
ε_{mf}	porosidad de mínima fluidización, (adimensional)
μ_g	viscosidad de la fase gaseosa, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
ρ	densidad de fase, $kg.m^{-3}$
$\hat{\rho}_q$	densidad efectiva de la fase q, $kg.m^{-3}$
τ_s	tiempo de relajación para un conjunto de partículas, s
$\bar{\tau}_q$	tensor esfuerzo-deformación para la fase q, $Pa.lb_f.ft^2$
Δp	pérdida de carga del lecho fluidizado, Pa
ϕ_e	diámetro externo, m
ϕ_i	diámetro interno, m

Sub-índices

g	fase gas
p	fase genérica
q	fase genérica
s	fase sólida

REFERENCIAS

- Acosta-Iborra, A., Sobrino, C., Hernández-Jimenez F., and de Vega, M., Experimental and computational study on the bubble behavior in a 3-D fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, doi:10.1016/j.ces.2011.04.009, 2011.
- ANSYS, Inc., *ANSYS-Fluent 13.0, Theory Guide*, 2011.
- Asegehegn, T. W., Schreiber, M. and Krautz, H., Numerical study of bubbling gas-solid fluidized beds hydrodynamics: influence of immersed horizontal tubes and data analysis. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Vol.9, A36, 1-37, 2011.
- Barreira, V., M. Hidrodinámica de un lecho Fluidizado. *Tesis de Ingeniería química*, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2007.
- Castells, X.T., *Tratamiento y valorización energética de residuos*, Ediciones Díaz de Santos, España, 2005.
- Cengel, Y.A. y Cimbala, J.M. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, McGraw-Hill Interamericana, México, 2006.
- Cornelissen, J.T., Taghipour, F., Escudí, R., Ellis, N. and Grace J.R., CFD modeling of a liquid-solid fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 62, 6334-6348, 2007.
- Davidson, J.F., Clift, R., and Harrison, D., *Fluidization, 2nd Edition*, Academic Press Inc. (London) Ltd., 1985.
- Duarte, C.R., Olazar, M., Murata, V.V. and Barrozo, M.A.S., Numerical simulation and experimental study of fluid-particle flows in a spouted bed. *Powder Technology*, 188 (3), 195-205, 2009.
- Ergun, S., Fluid Flow through Packed Columns, *Chem. Eng. Prog.*, 48(2):89-94, 1952.
- Falcoz, Q., *Vaporisation des métaux lourds pendant l'incinération des déchets ménagers cinétiques et processus de transfert*, Tesis Doctoral en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Perpignan, Francia, 2008.
- Formisani, B., Girimonte, R. and Mancuso, L., Analysis of the Fluidization Process of Particle Beds at High Temperature. *Chemical Engineering Science*, 53:951-961, 1998.
- Gidaspow, D., Bezburaah, R., and Ding, J., Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In *Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, pages 75-82, 1992.
- Gunn, D. J., Transfer of Heat or Mass to Particles in Fixed and Fluidized Beds. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21:467-476, 1978.
- Horio, M., Research and Development on Emission Abatement in a Fluidized Bed Combustor in Japan. *Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Bed Combustion*, Volume 2, 1980.
- Hosseini, S.H., Ahmadi, G., Rahimi, R., Zivdar, M. and Esfahany, M.N., CFD studies of solids hold-up distribution and circulation patterns in gas-solid fluidized beds. *Powder Technology*, 200, 201-215, 2010.
- Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, John Wiley and Sons Inc. (New York), 1990.

- Pain, C.C., Mansoorzadeh, S. and de Oliviera, C.R.E., A study of bubbling and slugging fluidized beds using the two-fluid granulat temperatura model. *International Journal of Multiphase Flow*, 27, 527-551, 2001.
- Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Taylor and Francis Ed., USA, 1980.
- Reuge, N., Cadoret, L., Coufort-Ssaudejaud, C., Pannala, S., Syamlal, M. and Caussat, B., Multifluid Eulerian modeling of dense gas-solid fluidizaed bed hidroynamics: influence of the dissipation parameters. *Chem. Eng. Sci.*, 22, 5540-5551, 2008.
- Taghipour, F., Ellis, N. and Wong, C., Experimental and computational study of gas-solid Fluidized bed hydrodynamics. *Chem. Eng. Sci.*, 60, 6857-6867, 2005.
- Wakao, N., Kaguei, S. and Funazkri, T., Effect of Fluid Dispersion Coefficients on Particle to Fluid Heat Transfer Coefficients in Packed Beds: Correlation of Nusselt Numbers. *Chemical Engineering Science*, 34:325 – 336, 1979.
- Werther, J. and Ogada, T. Sewage sludge combustion. *Prog. in Energy and Comb. Sci.*, 25, 55-116, 1999.
- Wen, C.Y. and Yu, Y. H., Mechanics of Fluidization. *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, 62:100-111, 1966.