
ANÁLISIS POR FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS EN UN PROTOTIPO DE LECHO FLUIDIZADO

DANIELA I. GALLARDO-CORREA, JOSÉ R. HERNÁNDEZ-BARAJAS, RAÚL G. BAUTISTA-MARGULIS y AGUSTÍN R. URIBE-RAMÍREZ

RESUMEN

La incineración en lecho fluidizado ha demostrado ser una de las tecnologías más eficientes y adecuadas para la incineración de residuos lignocelulósicos que por razones higiénicas y ambientales no pueden ser reciclados o reutilizados. En este estudio se analizan los aspectos fluidodinámicos de un prototipo experimental de incineración para examinar el desempeño de cuatro modelos bidimensionales en estado no estacionario, representando a un sistema gas-sólido para las interacciones entre el aire necesario para la combustión y la arena empleada como promotor de la transferencia de masa y de calor. Los modelos examinados fueron definidos de acuerdo al régimen de flujo (laminar y turbulento) y a la temperatura del sistema (tempera-

tura ambiente y temperatura de reacción). Los resultados indican que el prototipo experimental se comporta como un lecho burbujeante en régimen laminar y de tipo slugging en régimen turbulento. Por otra parte, los patrones de flujo de la velocidad demostraron que el sistema en ambos regímenes se comporta como un tanque perfectamente mezclado, debido a que el aire coadyuva en el mezclado turbulento. En el futuro se incluirá la cinética química de la combustión de residuos en el modelo CFD, lo que permitirá sugerir cambios al diseño original mejorando aspectos que impactan en el desempeño global del incinerador tales como la fluidización, el intercambio de masa y energía, y la pérdida del material inerte por arrastre.

La escasez de sitios adecuados para la disposición final de residuos sólidos municipales (RSM), así como el incremento notable de problemas ambientales vinculados con tales sitios, ha derivado en regulaciones gubernamentales más estrictas y un aumento en los costos asociados con la disposición final de dichos residuos. En este contexto, la incineración se ha convertido en una de las alternativas de tratamiento de RSM de mayor interés debido a que permite reducir el volumen de

residuos, especialmente aquellos que no puedan ser reciclados o reutilizados, tales como residuos biológico-infecciosos cuyo tratamiento térmico permite eliminar riesgos en su manejo y disposición final. Desde el punto de vista económico y ambiental se ha reportado que los incineradores de lecho fluidizado han demostrado ser una de las tecnologías más eficientes y adecuadas para la incineración de desechos agrícolas, orgánicos, de madera, carbón, plásticos, lodos contaminados, biomasa y, por lo tanto, mezclas de ellos (Wer-

ther *et al.*, 2000; McKendry, 2002; Gungor, 2008). La incineración es un proceso de combustión que consiste en la combustión de materiales con apreciable contenido de carbono para su oxidación final a dióxido de carbono y vapor de agua. La incineración de residuos en lecho fluidizado es un sistema reactivo conformado por tres fases: una fase gaseosa (gases de combustión) y dos fases sólidas: la fase sólida reactiva (en este caso, el residuo que desea incinerarse) y la fase sólida inerte (en este estudio, arena sílice).

PALABRAS CLAVE / CFD / Incineración / Lecho Fluidizado / Modelo Matemático / Residuo /

Recibido: 18/11/2011. Modificado: 20/10/2012. Aceptado: 22/10/2012.

Daniela I. Gallardo-Correa. Ingeniera Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México. Magister en Ciencias Ambientales, UJAT, México. Supervisora en Protección Ambiental, Noble Corporation, México. e-mail: dgallardo@noblecorp.com

José R. Hernández-Barajas. Ingeniero Químico, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México. Doctor en Ciencias de la Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, México. Profesor Investigador, UJAT, México. Dirección: División Académica de Ciencias Biológicas, UJAT. Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, Bosques de Saloya, Villahermosa, Tabasco, México. e-mail: roberto.hernandez@ujat.mx

Raúl G. Bautista-Margulis. Ingeniero Químico, Universidad Veracruzana, México. Doctor en Ciencias de la Combustión y Control de la Contaminación Ambiental, University of Sheffield, RU. Profesor Investigador, UJAT, México. e-mail: margulis@ujat.mx

Agustín R. Uribe-Ramírez. Doctor en Ciencias en Ingeniería Química. University of Manchester Institute of Science and Technology, RU. Profesor, Universidad de Guanajuato, México. e-mail: agustin@ugto.mx

La dinámica de fluidos por computadora (CFD, del inglés *Computational Fluid Dynamics*) es una herramienta numérica para la simulación del complicado flujo de fluidos, transferencia de masa y reacciones químicas en un sistema. Esta herramienta ha cobrado relevancia en la última década ya que permite el modelado y simulación para fines predictivos, permitiendo probar diferentes escenarios que pueden ser demasiado costosos o de riesgo ambiental como para ser experimentados en sistemas de escala industrial. En la literatura especializada se han reportado estudios sobre el modelado y simulación de sistemas de incineración en lecho fluidizado. Galgano *et al.* (2005) desarrolló un modelo de lecho fluidizado burbujeante con combustión de biomasa y fue usado para evaluar el efecto de las condiciones de operación en la dinámica del incinerador. Para simplificar la complejidad de la dinámica de fluidos, se han propuesto modelos de incineración en lecho fluidizado con base en la teoría de las dos fases emulsión-burbuja, en la que se supone que el lecho denso del incinerador se comporta como un tanque perfectamente agitado (Bautista-Margulis *et al.*, 1996; Di Blasi, 1997; Marias *et al.*, 2001; Bautista Margulis *et al.*, 2002). Recientemente, diversas investigaciones han reportado el empleo de técnicas de CFD para la representación global de un incinerador, ya sea de tipo de lecho empacado, lecho fijo o lecho fluidizado, aunque la mayoría de estos estudios han estado enfocados al análisis de la combustión de carbón mineral, proceso que tiene como propósito principal la generación de energía eléctrica (Consonni *et al.*, 2005; Bosoaga *et al.*, 2006; Farid *et al.*, 2006; Pallarés *et al.*, 2006; Vuthaluru y Vuthaluru, 2006; Ma *et al.*, 2007; Rosendahl *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2007).

Dutta *et al.* (2010) llevaron a cabo simulaciones CFD para estudiar el comportamiento hidrodinámico de un lecho fluidizado rotatorio en una geometría estática para flujos gas-sólido. Las simulaciones proporcionan directrices para el diseño y operación con alta eficiencia en transferencia de *momentum* gas-sólido, excelente separación gas-sólido y pérdidas limitadas de sólidos. En adición, un comportamiento de lecho inestable, como *slugging*, es también numéricamente predicho. Recientemente, Gungor (2008) propu-

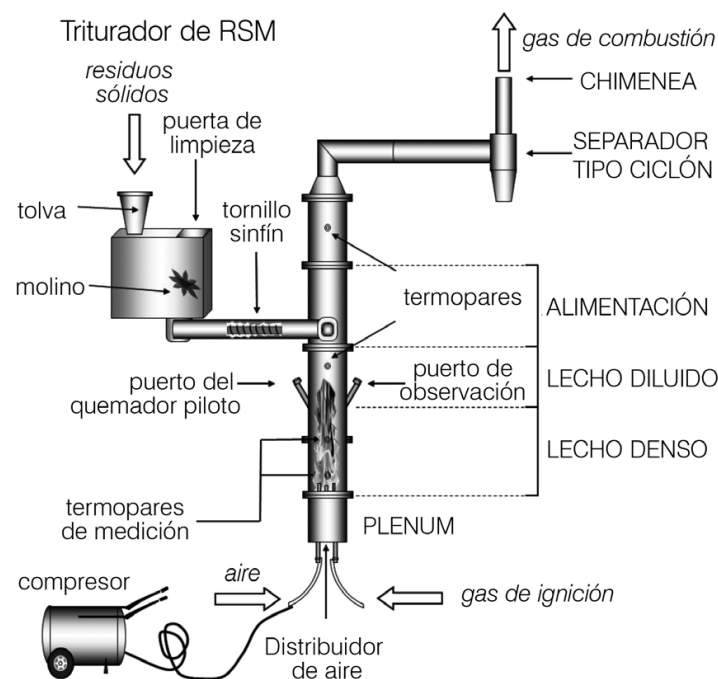


Figura 1. Esquema general del prototipo experimental disponible y sus equipos auxiliares.

so un modelo 2D de un incinerador de biomasa en lecho burbujeante el cual acopla a la fluido-dinámica, transferencia de calor y aspectos cinéticos asociados a la combustión. En la actualidad, las investigaciones sobre el efecto combinado de parámetros de diseño y condiciones de operación en incineradores de biomasa en lecho fluidizado se encuentran limitadas. En este estudio se emplea un modelo de CFD para la representación de un prototipo experimental de incineración de RSM de naturaleza lignocelulósica, con el propósito de conocer dichos efectos combinados y su impacto en la dinámica de las variables fluido-dinámicas más importantes: tipo de fluidización, patrones de flujo, la altura del lecho expandido y la fracción volumétrica promedio de la fase sólida inerte en el lecho denso del incinerador. Los resultados obtenidos permitirán establecer modificaciones en el diseño mecánico del prototipo experimental para asegurar una fluidización efectiva en la zona de reacción.

Experimental

Descripción del prototipo experimental

En este estudio se analizan los aspectos fluido-dinámicos de un prototipo experimental de incineración de residuos sólidos que fue diseñado y construido, y ha sido operado con éxito en la División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Ta-

basco, México (López-Ocaña, 2004, 2009; López-Ocaña *et al.*, 2008a; Bautista-Margulis *et al.*, 2008). El incinerador (Figura 1) consiste de tres secciones cilíndricas de diámetro interno de 0,1m (4 pulgadas) de acero al carbón cédula 40. La sección inferior tiene una altura de 0,45m mientras que las secciones restantes poseen 0,50m de altura. En la sección intermedia del incinerador, existen dos puertos colocados en lados opuestos; uno de los puertos se emplea para introducir el quemador piloto durante el inicio de operaciones y el otro es un puerto de observación. La sección superior posee una entrada para la alimentación de los RSM; además, en cada sección del incinerador se encuentran orificios de 0,0127m (media pulgada) de diámetro en donde se enroscan los termopares y, en adición, existen dos orifi-

cios para la medición de la caída de presión a lo largo del incinerador.

Como equipos auxiliares, se cuenta con una unidad de trituración de RSM, un compresor de aire, un separador tipo ciclón y un ducto de ventilación de gases de chimenea. El aire necesario para la combustión es enviado al *plenum*, el cual contiene el plato distribuidor de aire. Este plato distribuidor es de acero inoxidable con un diámetro interno de 10cm y con un espesor de 1cm. El plato está constituido por siete toberas verticales tipo Tuyere, distribuidas radialmente. Cada tobera se compone de un tubo hueco de acero inoxidable de 0,9cm de diámetro y 5,4cm de longitud total, de los cuales 4,4cm sobresalen del plato distribuidor al que están soldados. En cada tobera, el extremo superior está sellado y a 0,7cm de éste se localizan cuatro orificios equidistantes de 0,2 de diámetro. El plato distribuidor fue diseñado para poseer una caída de presión del 1% de la caída de presión en el lecho denso con una altura máxima de lecho expandido de 30cm. La caída de presión en el plato distribuidor fue estimada teóricamente con las ecuaciones típicas de diseño de platos perforados a partir del procedimiento propuesto por Karri y Werther (2003). Con base al número de orificios así como la densidad y altura promedio del lecho expandido, calculados a la temperatura promedio de combustión, la caída de presión típica en el plato distribuidor es de 35Pa, una pérdida de carga razonable para incineradores a pequeña escala.

En López-Ocaña *et al.* (2008b) se presentan mayores detalles del diseño y la configuración mecánica del combustor y equipos auxiliares empleados en este estudio.

Descripción del modelo de CFD

El paquete de cómputo comercial GAMBIT 2.3.16 (ANSYS Inc., EEUU) fue usado en la generación de un modelo bidimensional CAD de la geometría del dominio fluido. Para la generación de la malla numérica se empleó una geometría con las mismas dimensiones del prototipo experimental. Los puertos de observación y de muestreo no fueron incluidos ya que las simulaciones preliminares demostraron una influencia poco significativa sobre el comportamiento fluido-dinámico. Para la representación bidimensional, se realizó un corte central y longitudinal en el cuerpo del incinerador, resultando en un plano que contiene tres de las siete toberas del plato distribuidor, cada una con dos orificios para la distribución de aire. A partir del corte geométrico se construyó una malla simple constituida por elementos cuadrados y de tamaño uniforme obteniéndose 38682 elementos y 39572 nodos, permitiendo que el tiempo de cómputo y capacidad de memoria fuera menor en comparación a geometrías de malla complejas.

El modelo matemático del prototipo de incineración en lecho fluidizado incluye una descripción detallada de las variaciones de energía y *momentum* en el espacio y el tiempo. Un modelo euleriano-euleriano fue usado para estudiar las interacciones gas-sólido. Las ecuaciones de conservación fueron resueltas con el paquete comercial CFD FLUENT 6.3.26 (ANSYS Inc., EEUU) en modo de precisión simple y con los méto-

TABLA I
CARACTERÍSTICAS Y PARTICULARIDADES DE LOS MODELOS
2D EN ESTADO NO ESTACIONARIO

Características del modelo	Modelo Laminar	Modelo Turbulento
Estado del modelo	No estacionario	No estacionario
Sistema de coordenadas	Euleriano-euleriano	Euleriano-euleriano
Número de fases	2 (gas-sólido)	2 (gas-sólido)
Régimen de flujo	Laminar	Turbulento
Características del flujo		
Modelo de turbulencia	No aplica (N/A)	k-ε estándar
Tratamiento de la pared	N/A	estándar
Correlación para el coeficiente de arrastre	Gidaspow	Gidaspow
Características numéricas		
Tipo de solucionador (<i>solver</i>)	Basado en presión	Basado en presión
Aproximaciones numéricas	Primer orden	Primer orden
Método numérico de solución matricial	Gauss/gradiente conjugado	Gauss/gradiente conjugado
Criterio de convergencia	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³
Tipo de paso de tiempo	Adaptable	Adaptable
Tamaño de paso mínimo (s)	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁹
Tamaño de paso máximo (s)	0,05	1×10 ⁻⁵

dos y estrategias de solución numérica que se enlistan en la Tabla I.

En resumen, se estudiaron dos modelos bidimensionales en estado no estacionario con la estrategia de solución basada en la presión, en donde la restricción de la continuidad del campo de velocidades se logra mediante la solución de una ecuación de presión. Las ecuaciones del modelo son la ecuación de continuidad y la conservación de *momentum* en dirección x e y calculadas para ambas fases, utilizándose aproximaciones de primer orden para las derivadas de las ecuaciones. Como criterio de convergencia se establecieron valores de los residuales de cada ecuación como 1×10⁻³ usando un tamaño de paso del tiempo adaptable para optimizar el tiempo de ejecución. Dependiendo del régimen de flujo, el primer modelo estudiado es de tipo laminar mientras que el segundo es de tipo turbulento. En este último caso se seleccionó el método k-ε estándar y fue necesario emplear tamaños de paso de tiempo más pequeños, para cumplir con el mismo criterio de convergencia establecido en el modelo laminar.

Con respecto a los parámetros fluido-dinámicos

y condiciones de operación establecidos en el diseño del prototipo experimental, en la Tabla II se presentan los valores promedio que fueron utilizados para realizar las simulaciones de CFD. Así mismo, la definición de las propiedades físicas de las fases gaseosa y sólida se indican en la Tabla III. Las propiedades de la fase sólida, tales como viscosidad y esfuerzo cortante, fueron obtenidas a partir de la teoría cinética de flujos granulares. En este estudio, el dominio de la solución sólo considera a la cámara de combustión, es decir, el cuerpo cilíndrico del incinerador. Como resultado, las condiciones de frontera establecidas fueron la velocidad de entrada para cada uno de los orificios de las toberas, el flujo de salida establecida a la salida del cuerpo del incinerador (cámara de combustión) y, finalmente, condiciones de pared aplicadas a las paredes del incinerador y las paredes de las toberas. Debe recordarse que las condiciones de frontera en la pared son usadas para limitar regiones fluidas de regiones sólidas.

Como se mencionó anteriormente, el modelo de CFD propuesto es bifásico, lo que es una suposición razonable considerando que el flujo de alimentación de RSM (la fase sólida reactiva) es

TABLA II
PARÁMETROS FLUIDO-DINÁMICOS
Y DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO
DE INCINERACIÓN

Parámetro	Valor promedio
Criterios de Diseño	
Fracción volumétrica de arena en el lecho estático (m ³ ·m ⁻³)	0,63
Altura del lecho estático (m)	0,20
Condiciones de Operación	
Presión del sistema (atm)	1
Temperatura del sistema (K)	
Simulación en frío	298
Simulación a temperatura de reacción	973
Velocidad de entrada de aire en cada orificio de tobera, v _a (m·s ⁻¹)	5

TABLA III
FASES Y PROPIEDADES DEL SISTEMA GAS-SÓLIDO

Propiedades	Fases		
	Aire (continua)		Arena (discreta)
	T= 298K	T= 973K	
Densidad, ρ (kg·m ⁻³)	1,17	0,36	2630
Viscosidad, μ (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	1,8×10 ⁻⁵	4,1×10 ⁻⁵	1,003×10 ⁻³

dos órdenes de magnitud menor que el flujo de aire. Además, se ha determinado experimentalmente que la densidad de la partícula de RSM de naturaleza lignocelulósica oscila entre 300 y 600kg·m⁻³, un valor apreciablemente menor a la densidad de las partículas de la arena sílice (la fase sólida inerte), de 2630kg·m⁻³ (López-Ocaña, 2009). Por lo anterior, el efecto de la fase sólida reactiva en la fluido-dinámica del lecho denso del incinerador puede considerarse despreciable.

Resultados y Discusión

En este estudio se analiza los regímenes de fluidización de dos modelos 2D y bifásicos para la simulación de la fluido-dinámica del prototipo experimental de incineración de residuos. En cada modelo se describen las características fluido-dinámicas relevantes, tales como la fracción volumétrica, los patrones de flujo de velocidad y la altura del lecho expandido.

Modelo en flujo turbulento y a temperatura ambiente

Se desarrolló un modelo bidimensional compuesto de dos fases, una fase gaseosa (aire) como fase continua y una fase sólida inerte (arena) como fase discreta. Dicho sistema se modeló a régimen de flujo laminar como un estimado inicial del comportamiento del sistema. Dado que el modelo no incluye a la ecuación de energía, el modelo resultante asemeja la operación de los modelos físicos 'en frío', en los que sólo interesa explorar las propiedades fluido-dinámicas del sistema. Como resultado de esta simulación considerando un flujo laminar, el lecho exhibió una expansión de 24,6cm a un tiempo de 3,2s, mientras que la fracción volumétrica de la fase sólida fue de $\epsilon_s = 0,58$. Estos resultados permitirán conocer si la suposición de flujo laminar, una suposición que permite simplificar al modelo matemático y, por ello, reducir significativamente el tiempo de cómputo, al tiempo que permite predecir satisfactoriamente las tendencias dinámicas del sistema en estudio.

Como se indica en la Tabla II, la fracción volumétrica inicial de sólido en el lecho denso es $\epsilon_s = 0,63$ y por lo tanto existe un espacio intersticial (fracción volumétrica de gas) $\epsilon_g = 0,37$. Sin embargo, como consecuencia del avance de la fluidización, la fracción volumétrica de la fase sólida inerte disminuirá debido a la presencia de aire, ya que éste ocupará mayor espacio durante la expansión del lecho de la fase sólida inerte. Como consecuencia de la expansión, la altura del

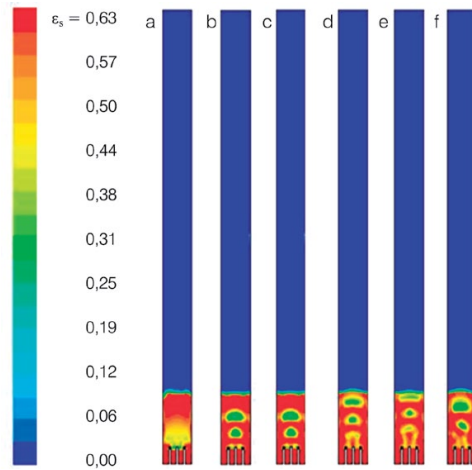


Figura 2. Contornos de la fracción volumétrica de sólido a diferentes tiempos de simulación. a: $t = 0,2s$; b: $t = 0,7s$; c: $t = 1,3s$; d: $t = 3,1s$; e: $t = 4,5s$; f: $t = 6s$.

lecho se incrementará algunos centímetros y el cálculo de esta diferencia es un factor relevante en la estimación de la extensión de la región de chapoteo (*splashing zone*) del lecho.

Para las simulaciones del modelo de flujo turbulento se utilizaron los criterios y condiciones de operación dados en la Tabla III. En un modelo con flujo turbulento, las velocidades de flujo son generalmente muy altas o los fluidos suelen tener fuerzas viscosas muy pequeñas. La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por la existencia de capas que se mueven a diferentes velocidades. En el caso de un incinerador de lecho fluidizado, donde coexisten varias fases (de hecho hasta tres fases: dos fases sólidas, por ejemplo la arena y el residuo, y una fase gaseosa, por ejemplo los gases de combustión) la turbulencia no se debe solamente a la fricción con las paredes sino a la diferencia de densidades entre fases, que causa a su vez una diferencia de velocidades (condición de deslizamiento o *slip condition*). Una de las características deseables de un lecho fluidizado es su condición de régimen turbulento, el cual mejora la transferencia de masa y de calor. Para representar la turbulencia se examinaron varios modelos, encontrándose que para nuestro sistema de estudio, los diferentes modelos de turbulencia no exhiben diferencias numéricas significativas entre ellos. Por lo anterior, el modelo k- ϵ estándar es empleado para representar el comportamiento turbulento, debido a que reduce el esfuerzo computacional. La Figura 2 presenta lo anteriormente mencionado, en donde la inclusión de un modelo de turbulencia permitió que el comportamiento de

dichas fases sea más representativo del sistema en estudio. La Figura 2a muestra que, a partir del modelo de turbulencia, en la vecindad del plato distribuidor, conformado por toberas y orificios de entrada de aire, inevitablemente se generan turbulencias y remolinos en el flujo. Dado que el propósito de las toberas es distribuir el aire en toda la sección transversal del incinerador, al cabo de un tiempo comienza a registrarse un lecho burbujeante (Figuras 2b y 2c); cuyas burbujas ascienden a través del lecho (Figura 2d), uniéndose entre ellas (coalescencia) y finalmente desintegrándose al llegar a la superficie (Figura 2e). La Figura 2f muestra un estado estacionario del proceso, ya que a un tiempo de operación de 6s, las etapas de fluidización descritas anteriormente se repiten en ciclos con un tiempo promedio de duración de 4s. Considerando los mismos valores y características del tipo de partícula, altura del lecho y fracción volumétrica inicial del apartado anterior, el modelo de turbulencia predice una fracción volumétrica menor; en este caso, $\epsilon_s = 0,52$ como resultado de una representación más precisa de la expansión turbulenta del lecho. Debe notarse que, en modelos fluidodinámicos, el concepto de estado estacionario suele ser ambiguo. Es decir, un sistema de lecho fluidizado no suele alcanzar un estado estacionario perfecto en el cual las variables de estado se mantienen constantes en función del tiempo. Lo anterior se debe a que el ciclo de formación, coalescencia y escape del lecho denso de las burbujas no permite que esta condición de estado estacionario se cumpla. Por ello, en este estudio se considera que ocurre un estado quasi-estacionario en periodos de varios segundos, y los valores de las variables de estado aquí mostradas, como es el caso de las fracciones volumétricas y las velocidades de ambas fases, fueron calculados de manera instantánea al final del ciclo de formación, coalescencia y escape de la burbuja del lecho denso.

Por otra parte, los vectores de velocidad permiten explorar los patrones de flujo del sistema y de esta forma determinar la idealidad de su comportamiento. Para el caso de la fase continua, en la Figura 3 se observa que los patrones de velocidad son similares a un flujo pistón; sin embargo, en la fase discreta (Figura 4) las trayectorias no presentan un perfil radial o longitudinal, sugiriéndose que esta fase se comporta principalmente como un tanque perfectamente agitado.

Así mismo, cabe observar que la inclusión de un modelo de turbulencia permitió considerar la formación de remolinos en la fase discreta. También, se muestra que una pequeña fracción volumétrica de arena es arrastrada a

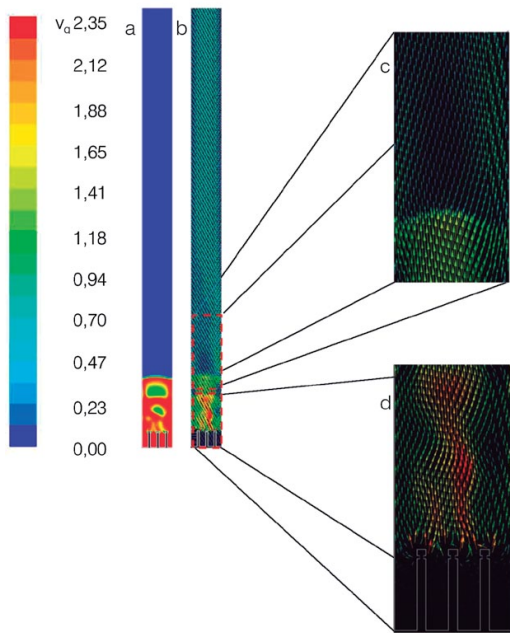


Figura 3. Comportamiento de la velocidad del aire (fase continua) en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $t=6\text{s}$ y $T=298\text{K}$. a: contornos de fracción volumétrica en flujo turbulento, b: vectores de velocidad del aire en el incinerador, c: vectores de velocidad del aire en el lecho libre del incinerador, d: vectores de velocidad en el lecho denso a nivel de toberas.

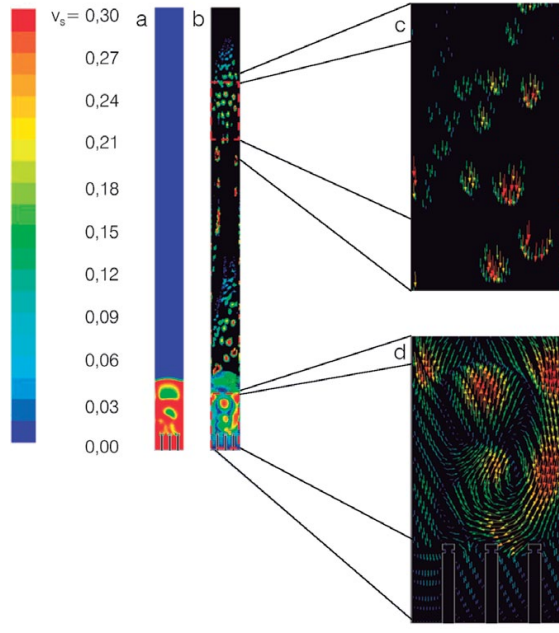


Figura 4. Comportamiento de la velocidad de la arena (fase continua) en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $t=6\text{s}$ y $T=298\text{K}$. a: contornos de fracción volumétrica en flujo turbulento, b: vectores de velocidad del aire en el incinerador, c: vectores de velocidad del aire en el lecho libre del incinerador, d: vectores de velocidad en el lecho denso a nivel de toberas.

lo largo del incinerador por acción del aire, donde las agrupaciones con mayor volumen caerán nuevamente al lecho por acción de la gravedad, mientras que otras saldrán del cuerpo del incinerador. Por ello, es de vital importancia implementar sistemas de recolección de partículas de alta eficiencia para este tipo de sistemas. En el caso del prototipo experimental en estudio, éste cuenta con un separador tipo ciclón diseñado para recolectar partículas finas de arena y de cenizas.

Modelos en flujo turbulento con fase continua y discreta a la temperatura de reacción

La temperatura y la presión afectan la operación de los sistemas gas-sólido porque ambos parámetros afectan a las propiedades termo-físicas, particularmente a la densidad y viscosidad del gas. La variación de estas propiedades determina el efecto de la temperatura y la presión en la fluido-dinámica del le-

cho. En este apartado se presenta una comparación de dos modelos, uno estableciendo la fase continua a temperatura de reacción de 973K (sistema gas caliente-sólido frío) y el otro estableciendo la fase discreta a dicha temperatura (sistema gas frío-sólido caliente). En la Figura 5 se puede observar el comportamiento dinámico de la fracción volumétrica de la fase discreta para el sistema gas caliente-sólido frío. A un tiempo de $\sim 0,2\text{s}$ (Figura 5c) se observa que la temperatura de reacción causa una densidad menor de la fase continua (aire) implicando un ascenso a mayor velocidad por el lecho por lo que el tiempo de contacto y de mezclado con la fase discreta (arena) es consecuentemente menor. En un lecho fluidizado, la

fase discreta inerte es un promotor de la transferencia de masa y de calor por lo que un contacto ineficiente con la fase continua resultaría en mayores resistencias de transferencia. Con respecto a las fracciones volumétricas de las fases, la fracción de la fase sólida fue calculada como $\epsilon_s=0,47$ y la fracción vacía fue $\epsilon_g=0,53$.

Por otra parte, a partir de estos resultados es posible determinar el tipo de régimen de fluidización. De forma general, este lecho correspondería a una fluidización agregativa ya que en el mismo se presenta la formación de burbujas que contienen una fracción baja de la fase sólida, por lo tanto el lecho podría clasificarse como un lecho burbujeante pudiendo también ser un lecho donde ocurre el fenómeno de *slugging*; es decir, un lecho cuyas burbujas se comportan como un proyectil o bala y que ocupa toda la sección transversal del incinerador tubular. Debe recordarse que el fenómeno de *slugging* es, hasta el momento, un concepto teórico, hipotético, que no ha sido comprobado experimentalmente.

En la Figura 6 se muestran resultados de la simulación del modelo del sis-

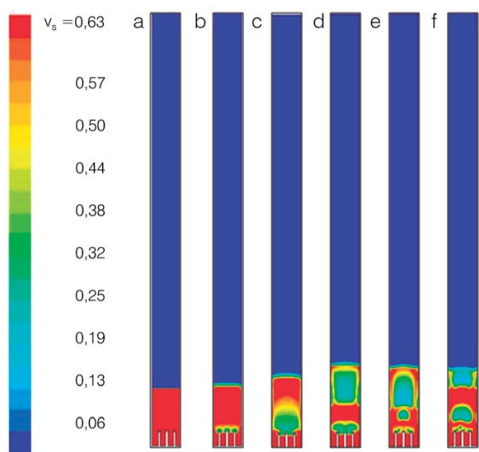


Figura 5. Comportamiento dinámico de la fracción volumétrica de la fase sólida a flujo turbulento y fase continua a temperatura de reacción. a: $t=0\text{s}$; b: $t=0,05\text{s}$; c: $t=0,17\text{s}$; d: $t=0,44\text{s}$; e: $t=1,1\text{s}$; f: $t=4\text{s}$.

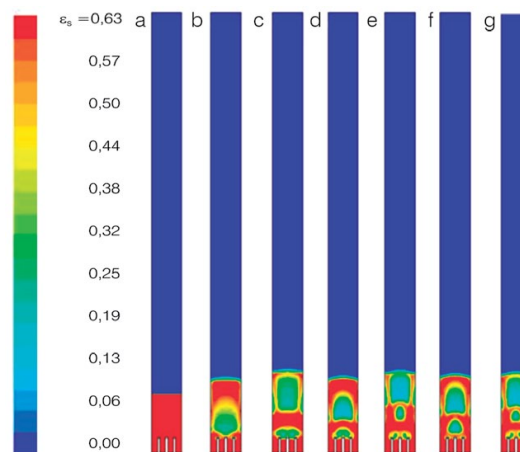


Figura 6. Comportamiento dinámico de la fracción volumétrica de la fase sólida a flujo turbulento y fase discreta a temperatura de reacción. a: $t=0\text{s}$; b: $t=0,17\text{s}$; c: $t=0,44\text{s}$; d: $t=0,73\text{s}$; e: $t=0,93\text{s}$; f) $t=1,2\text{s}$; g: $t=3,1\text{s}$.

TABLA IV
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS FLUIDO-DINÁMICOS EN ESTADO ESTACIONARIO EN FUNCIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO Y LA TEMPERATURA DEL SISTEMA PARA ALTURA DE LECHO ESTÁTICO DE 20cm

Simulación	Altura del lecho (cm)	Fracción volumétrica de sólido ($m^3 \cdot m^{-3}$)
Flujo laminar a temperatura ambiente	24,6 \pm 0,2	0,58 \pm 0,01
Flujo turbulento a temperatura ambiente	24,9 \pm 0,5	0,52 \pm 0,01
Flujo turbulento a temperatura de reacción		
Fase continua caliente	28,9 \pm 0,7	0,47 \pm 0,01
Fase discreta caliente	27,1 \pm 1,1	0,45 \pm 0,02

tema gas frío-sólido caliente. En comparación con el sistema gas caliente-sólido frío (Figura 5d) anterior y observando la Figura 6c, se muestran simulaciones a $t = 0,44s$, donde en la fase sólida caliente permitió que el gas se distribuyera con mayor facilidad debido al decremento de su densidad ocasionado por la transferencia de calor efectiva de la fase discreta. Posteriormente, a un tiempo de 0,73s se lleva a cabo la formación de la burbuja principal (Figura 6d) que al emerger dará lugar a una mayor expansión del lecho. Debido a lo anterior, las fracciones volumétricas en estado cuasi-estacionario fueron estimadas como $\epsilon_s = 0,45$ y una fracción vacía $\epsilon_g = 0,55$, resultados muy similares a los de la simulación con fase continua a temperatura de reacción. Finalmente en las Figuras 6c, f y g, se observa la formación de burbujas secundarias que de acuerdo a los criterios proporcionados por Stewart y Davidson (1967) cumplen con ciertas características de lecho tipo *slug*, *i.e.*, la altura de las burbujas fueron equivalentes al diámetro del incinerador.

Con fines de comparación, en la Tabla IV se resumen los resultados de las fracciones volumétricas de la fase sólida así como la altura del lecho expandido a condiciones de estado cuasi-estacionario de las simulaciones llevadas a cabo a flujo laminar, turbulento y turbulento con fase continua y discreta a temperatura de reacción con un lecho estático de 20cm.

Conclusiones

En esta investigación se ha analizado el comportamiento fluido-dinámico de un prototipo experimental de incineración de residuos utilizando técnicas de dinámica de fluidos por computadora (CFD). Con respecto al modelo de CFD propuesto, se ha encontrado que los diferentes modelos de turbulencia no exhiben di-

ferencias significativas en los resultados numéricos entre ellos. Por lo anterior, el modelo $k-\epsilon$ estándar es empleado para representar el comportamiento turbulento debido a que es un modelo clásico, es el modelo mejor comprendido y además permite reducir el esfuerzo computacional. A partir de las simulaciones realizadas a diferentes condiciones se conoció el tipo de régimen de fluidización, resultando un lecho burbujeante en los modelos en frío y lecho fluidizado de tipo *slugging* en modelos a temperatura de reacción. Por consiguiente se demostró que el comportamiento del sistema depende mayormente de la temperatura, ya que el establecimiento de propiedades termo-físicas de las fases permitió conocer que la temperatura gobierna en mayor medida a la densidad y, por tanto, a la velocidad con la que se transporta en el lecho, por lo que el tiempo de contacto y mezclado con la fase discreta es menor. Así mismo, la temperatura también regirá el aumento o decremento de la fracción y altura del lecho, ya que un modelo a temperatura de reacción demostró obtener resultados más realistas que un modelo de simulación en frío. Posteriormente, los patrones de flujo de la velocidad demostraron que el sistema en ambos regímenes se comporta como un tanque perfectamente mezclado debido a que el aire coadyuva en el mezclado entre fases; sin embargo, al incluir un modelo de turbulencia, fue posible observar cierta fracción volumétrica arrastrada a través del incinerador, por lo que el estudio de la turbulencia es un factor clave en el diseño del sistema de recolección de partículas y los ductos de los gases de chimenea. Por su parte, el flujo de aire en la región libre (lecho diluido) del incinerador exhibe un comportamiento de flujo pistón, ya que la densidad del mismo comparada con la fase discreta difiere varios órdenes de magnitud. Adicionalmente, este estudio constituye una base para mejorar

el modelo de CFD e incluir la cinética química de la combustión de residuos sólidos de naturaleza lignocelulósica. En el futuro, las conclusiones de estas investigaciones coadyuvarán en la sugerencia de cambios al diseño original para mejorar aspectos tales como la fluidización, el intercambio de masa y energía, la disminución de pérdidas del material inerte debido al arrastre causado por los gases de combustión y que impactarán en el desempeño y eficiencia globales de la combustión en el incinerador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo financiero a través del Fondo Ciencia Básica 2005.

REFERENCIAS

- Bautista-Margulis RG, Siddall RG, Manzanar-Papayanopoulos LY (1996) Combustion modelling of coal volatiles in the freeboard of a calorimetric fluidized bed combustor. *Fuel* 15: 1737-1742.
- Bautista Margulis RG, Chacón-Nava JG, Arias del Campo E, Almerava-Calderón F, Gao-na-Tiburcio C, Martínez-Villafañe A (2002) Modelling of volatiles combustion and alkali deposition in a coal FBC. *Chem. Eng. Technol.* 25: 83-90.
- Bautista-Margulis RG, Hernández-Barajas JR, Saucedo-Terán RA (2008) Combustion of coal volatiles in the freeboard of a fluidized bed combustor: An experimental approach. *Int. Rev. Chem. Eng.* 1: 58-65.
- Bosoaga A, Panoiu N, Mihaescu L, Backreedy RI, Ma L (2006) The combustion of pulverised low grade lignite. *Fuel* 85: 1591-1598.
- Consonni S, Giuglano M, Grosso M (2005) Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste. Part B: Emission and cost estimates. *Waste Manag.* 25: 137-148.
- Di Blasi C (1997) Linear pyrolysis of cellulose and plastic wastes. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 40: 1463-1479.
- Dutta A, Ekature R, Heynderickx G (2010) Rotating fluidized bed with a static geometry: guidelines for design and operating conditions. *Chem. Eng. Sci.* 65: 1678-1679.
- Farid NA, Norzalia S, Mohammed FA (2006) The combustion of pulverised low grade lignite. *Int. J. Env. Stud.* 63: 313-329.
- Galgano A, Salatino P, Crescitelli S, Scala F, Maffettone PL (2005) A model of the dynamics of a fluidized bed combustor burning biomass. *Combust. Flame* 140: 371-384.
- Gungor A (2008) Two-dimensional biomass combustion modeling of CFB. *Fuel* 87: 1453-1454.
- Karri SBR, Werther J (2003) Gas distributor and plenum design in fluidized beds. En Yang WC (Ed.) *Handbook of Fluidization*

- and Fluid-Particle Systems. Dekker. Nueva York, EEUU. pp. 164-179.
- López-Ocaña G (2004) *Determinación de la Eficiencia de Combustión de Residuos Sólidos Municipales en un Combustor Trifásico bajo Diferentes Condiciones de Operación*. Tesis. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México. 127 pp.
- López-Ocaña G (2009) *Combustión de Materiales Lignocelulósicos Derivados de Residuos Sólidos Urbanos en un Combustor Experimental de Lecho Fluidizado*. Tesis. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México. 136 pp.
- López-Ocaña G, Bautista-Margulis RG, Hernández-Barajas JR, Rubio-Arias HO, Saucedo-Terán RA (2008a) Combustion of lignocellulosic materials in an experimental fluidized bed system. En Zamorano M, Brebia CA, Kungolos A, Popov V, Itoh H (Eds.) *Waste Management and Environment IV*. WIT Press. Southampton, RU. pp. 279-288.
- López-Ocaña G, Bautista-Margulis RG, Hernández-Barajas JR, Saucedo-Terán RA, Rubio-Arias HO (2008b) Combustión de residuos sólidos municipales en un sistema de lecho fluidizado experimental. *Univ. Cienc.* 24: 89-100.
- Ma L, Jones JM, Pourkashanian M, Williams A (2007) Modelling the combustion of pulverized biomass in an industrial combustion test furnace. *Fuel* 86: 1959-1965.
- Marias F, Puiggali JR, Flamant G (2001) Modeling for simulation of FBC process. *AIChE J.* 47: 1438-1460.
- McKendry P (2002) Energy production from biomass. Part II: Conversion technologies. *Bioresour. Technol.* 83: 47-54.
- Pallarés D, Johnsson F (2006) Macroscopic modeling of fluid dynamics in large-scale circulating fluidized beds. *Progr. Energy Combust. Sci.* 32: 539-569.
- Rosendahl LA, Søren CY, Kær K, Friborg K, Overgaard P (2007) Physical characterization of biomass fuels prepared for suspension firing in utility boilers for CFD modelling. *Biomass Bioenergy* 31: 318-325.
- Stewart PSB, Davidson JF (1967) Slug flow in fluidized bed. *Powder Technol.* 1: 61-80.
- Vuthaluru R, Vuthaluru HB (2006) Modelling of a wall fired furnace for different operating conditions using FLUENT. *Fuel Process. Technol.* 87: 633-639.
- Werther J, Saenger M, Hartge EU, Ogada T, Siagi Z (2000) Combustion of Agricultural Residues. *Progr. Energy Combust. Sci.* 26: 1-27.
- Yang W, Nam H, Choi S (2007) Improvement of operating conditions in waste incinerators using engineering tools. *Waste Manag.* 27: 604-613.

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS OF THE INCINERATION OF LIGNOCELLULOSIC SOLID WASTE IN AN PROTOTYPE FLUIDIZED BED COMBUSTOR

Daniela I. Gallardo-Correa, José R. Hernández-Barajas, Raúl G. Bautista-Margulis and Agustín R. Uribe-Ramírez

SUMMARY

Fluidized bed incineration has been considered as one of the most efficient and appropriate technologies for incineration of lignocellulosic solid waste that, due of health and environmental constraints, could not be recycled or reused. This study analyzes the fluid-dynamic aspects of a prototype incinerator examining the performance of four non-steady state bidimensional models, representing the gas-solid interactions between the air required for combustion and the sand used as a mass and heat transfer promoter. The models examined were defined according to their flow regime, laminar and turbulent, and the temperature of system (room temperature and reaction tempera-

ture). The results indicate that the experimental prototype behaves as a bubbling bed using a laminar regime model, and as a slugging bed in the case of a turbulent regime model. Moreover, the velocity patterns showed that both regimes behave as a well-mixed tank because the air contributes to the turbulent mixing. In the future, chemical kinetics of waste combustion will be incorporated in the CFD model in order to suggest modifications to the original design and to improve aspects affecting the overall performance of the incinerator, such as fluidization, mass and energy exchange and loss of inert material by entrainment.

ANÁLISE POR FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS EM UM PROTÓTIPO DE LEITO FLUIDIZADO

Daniela I. Gallardo-Correa, José R. Hernández-Barajas, Raúl G. Bautista-Margulis e Agustín R. Uribe-Ramírez

RESUMO

A incineração em leito fluidizado tem demonstrado ser uma das tecnologias mais eficientes e adequadas para a incineração de resíduos lignocelulósicos que por razões higiênicas e ambientais não podem ser reciclados ou reutilizados. Neste estudo se analisam os aspectos fluidodinâmicos de um protótipo experimental de incineração para examinar o desempenho de quatro modelos bidimensionais em estado no estacionário, representando a um sistema gás-sólido para as interações entre o ar necessário para a combustão e a areia empregada como promotor da transferência de massa e de calor. Os modelos examinados foram definidos de acordo ao regime de fluxo (laminar e turbulento) e à temperatura do sistema (temperatura ambiente

e temperatura de reação). Os resultados indicam que o protótipo experimental se comporta como um leito borbulhante em regime laminar e de tipo slugging em regime turbulento. Por outra parte, os padrões de fluxo da velocidade demonstraram que o sistema, em ambos os regimes, se comporta como um tanque perfeitamente misturado, devido a que o ar contribui na mistura turbulenta. No futuro se incluirá a cinética química da combustão de resíduos no modelo CFD, o que permitirá sugerir mudanças ao desenho original melhorando aspectos que impactam no desempenho global do incinerador tais como a fluidização, o intercâmbio de massa e energia, e a perda do material inerte por arraste.