Estudio mecánico e hidrodinámico de un reactor de gasificación de lecho fluidizado.

W. Rosales*, M. D. Andrade*, A. Gámez*, L. Rojas* , A. Pérez Navarro*.
[*]Departamento de Ingeniería Nuclear. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC).
Ave. Salvador Allende y Luaces. Plaza de la Revolución. C. Habana. Cuba.
[**]Instituto de Ingeniería Energética. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. España
E-mail: wrosales@instec.cu, mdolores@instec.cu

(Recibido el 10 de julio de 2007; aceptado el 12 de octubre de 2007)

Resumen.

Se realizó una simulación mediante Elementos Finitos y CFD de un prototipo de gasificador experimental a partir de una geometría propuesta. Se abordan aspectos termomecánicos, al calcularse las deformaciones originadas en el equipo, producto de su peso, en las condiciones de emplazamiento y la carga térmica a la que se somete. También se considera el flujo multifásico gas-sólido presente en el lecho fluidizado, se determina el rango de presiones y velocidades de trabajo del dispositivo, y se estudia la evolución del flujo. Para ello se utiliza el modelo de fuerza de arrastre y presión de sólido de Gidaspow, así como los criterios de velocidad mínima de fluidización de Wen & Yu y Kunii & Levenspiel.

Palabras claves: Gasificación, lecho fluidizado, CFD, FEM, flujo multifásico.

1. Introducción.

La simulación computacional ha probado ser una herramienta muy eficaz en casi todas las áreas de la ciencia moderna. En las diversas ramas de la ingeniería esto es innegable, por cuanto hoy no se concibe el diseño de ninguna instalación sin antes esta haber sido simulada y sus parámetros optimizados por este medio. En la industria energética, la simulación de procesos mecánicos y termohidráulicos ayudan a aumentar la eficiencia de aparatos existentes, y más aún, a construir equipos con nuevas prestaciones, siguiendo nuevas tecnologías, al reducir grandemente los costos de I+D (9).

Una técnica en gran desarrollo en estos momentos es el uso de la biomasa para la producción de energía de forma alternativa. La gasificación de esta biomasa, produce como resultado un gas combustible llamado "gas pobre" que, aunque no posee un alto poder calórico, sí tiene grandes prestaciones por cuanto puede almacenarse fácilmente, y emplearse para generar calor directamente (8), o para alimentar motores de combustión interna (4), que pueden ser utilizados de diversas formas: para la producción de energía eléctrica o para la producción de trabajo mecánico. El proceso de gasificación en sí puede obtenerse de diferentes formas, una de las más eficientes consiste en quemar parte de esta biomasa combustible en un lecho de arena fluidizada (2), el cual maximiza el contacto entre el combustible y el oxígeno del aire, a la vez que conduce el calor obtenido para producir una serie de reacciones de gasificación en la fracción de la biomasa que no se quemó. (9) Los gases de la gasificación son extraídos del reactor por un sistema de eyección, que garantiza una presión de vacío dentro del área de trabajo.

Aunque la técnica de lecho fluidizado (también conocida como lecho fluido), ha sido empleada ampliamente en áreas de la ingeniería química, en reactores de craqueo catalítico, en la polimerización de olefinas y la obtención de acrilonitrilo, etc.; la caracterización del flujo multifásico que incluye, aún no se comprende del todo. (1, 9).

2. Modelo del gasificador.

En el presente trabajo se modela un reactor de gasificación mediante lecho fluidizado, a escala experimental, desarrollado para la transformación (a temperaturas del orden de 900 ºC) de residuos orgánicos procedentes de la madera, para la producción de gas.

El equipo consta de un reactor de sección cilíndrica con dos cuerpos de diámetros distintos: el cuerpo superior tiene un diámetro interior de 200 mm y el cuerpo inferior, de 100 mm. Ambos cuerpos están acoplados mediante un enlace intermedio troncocónico. Todo el cuerpo inferior del reactor está envuelto por un encamisado exterior de 200 mm de diámetro (Figura 1). La altura del reactor es de 1000 mm (1100 si se incluye

© 2008 – Ediciones Mecánica.

la holgura desde el fondo del reactor al del encamisado). A través de este último se efectúa la entrada de aire, mezclado con una fracción de los propios gases producto del proceso, para conseguir la fluidización descrita y concentraciones de oxígeno sub-estequiométricas.

La entrada del aire y del gas al encamisado se produce por su parte superior, mientras que el paso al interior del reactor se produce por la parte inferior de éste. Para ello, el cuerpo inferior del reactor no está cerrado por debajo, sino que tiene dos placas perforadas por la que entran los gases. El objetivo de estas placas es lograr un flujo de aire lo más uniforme posible, eliminando turbulencias de grandes dimensiones.

Para el estudio se utilizó el software de simulación por Elementos Finitos ANSYS 10.0.

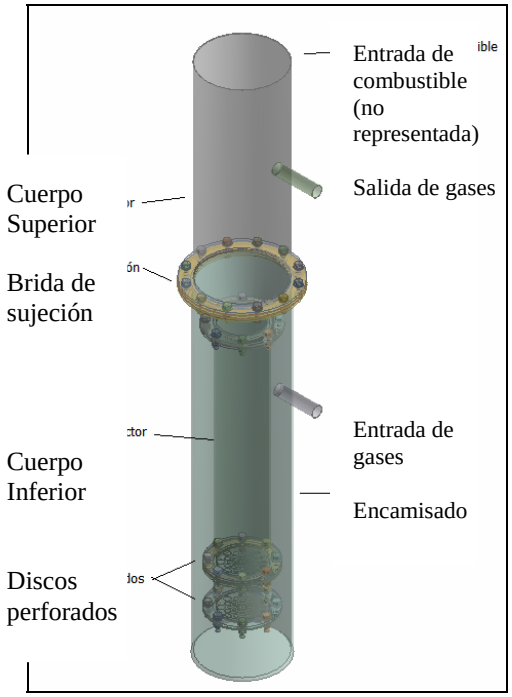

Fig. 1. Esquema del gasificador.

3. Estudio Termomecánico.

Las propiedades materiales propuestas para la simulación mecánica del reactor corresponden al acero inoxidable, grado AISI 304 (EN X5CrNi18-10) (13), con una densidad de 7850 kg/m^3, Módulo de Young de 2 x 10^{11} Pa y coeficiente de Poisson de 0.3, se considera el material trabajando en régimen de elasticidad lineal, y se desestiman los efectos de envejecimiento. El coeficiente volumétrico de expansión térmica del acero de los materiales se asume 1.2 x 10^{-5} K^{-1}.

Todas las piezas están compuestas por piezas de 2 mm de espesor, exceptuando los discos perforados, de 1mm y las bridas, de 5 mm de grosor. La masa total del equipo se calcula en 24.284 kg. La arena contenida en el reactor posee una masa de 8 kg. El ajuste de las bridas se logra mediante tornillos de 5 mm.

El reactor se hace suspender por la cara inferior de la brida de sujeción. La solicitación mecánica es la correspondiente a la del peso del dispositivo y la arena que contiene, bajo la acción de la gravedad. No se considera la acción de la presión interna.

La carga térmica está constituida por la temperatura alcanzada por la combustión de la biomasa (900 ºC), y se asume situada en el cuerpo inferior del reactor. (Figura 2).

Las deformaciones calculadas pueden ser observadas en la Figura 3. Las mismas están en el rango de milímetros, obteniéndose un máximo de 8.06 mm en la zona de la entrada de aire al cuerpo inferior del reactor.

Los resultados muestran un predominio de deformaciones mayores de 1 mm, situadas fundamentalmente en el cuerpo inferior del reactor, demostrando una gran influencia de los efectos de la dilatación térmica.

Para comprobar los efectos de la carga mecánica se realizó otra simulación, sin tomar en cuenta la solicitación térmica. Las deformaciones obtenidas a través de este estudio fueron del orden de 10^{-3} mm, o sea, tres órdenes menores y situadas mayormente en el encamisado, por lo cual pueden ser desestimadas.

4. Estudio Hidrodinámico.

Para el tratamiento hidrodinámico se consideró un modelo geométrico mucho más sencillo que el anterior, el domino está constituido por el volumen comprendido en el interior de los cuerpos superior e inferior, y el enlace troncocónico intermedio (Figura 4). En aras de disminuir los tiempos de cálculo se simplifica la entrada de aire, al no modelar los discos perforados y proponer un flujo con perfil uniforme; y la salida de gases, al asumir una salida vertical a través de toda la superficie superior del domino, desestimando posibles zonas de recirculación de gases en esta área, provocadas por una salida a través de una tubería horizontal.

Se utilizó un modelo de arena de una densidad de 2600 kg/m^3 y tamaño del grano de 0.25 mm, perteneciente al grupo “B” de Geldart (9). Las propiedades del gas de fluidización son las del aire a 25 ºC, de densidad 1.185 kg/m^3 y viscosidad dinámica 1.831e-05 Pa·s (1). No se modela la presencia de partículas de biomasa en el interior.

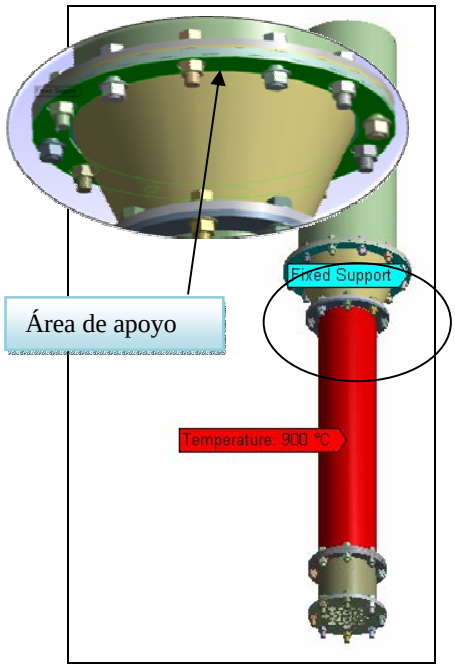

Fig. 2. Deformación Total (No se muestra el encamisado).

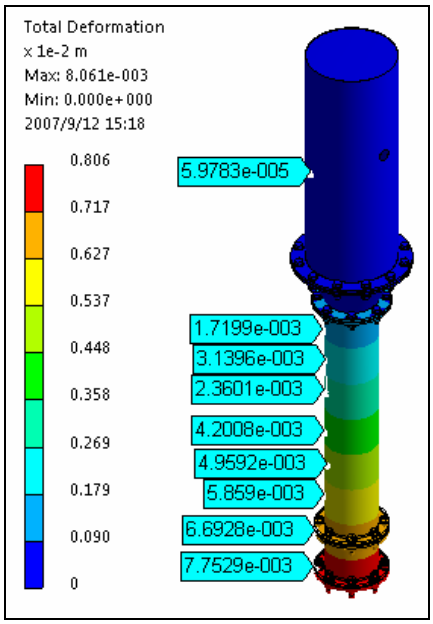

Fig. 3. Deformación Total (No se muestra el encamisado).

La velocidad de entrada del gas al lecho, también llamada velocidad de fluidización (V_f), es un parámetro de gran importancia (2). Siguiendo criterios de diversos autores (5, 6, 11), la velocidad mínima de fluidización depende únicamente del tamaño del grano de la arena, de las densidades de la arena y el aire y de la viscosidad de este último. Para los valores de estas magnitudes utilizados, los modelos de la literatura predicen un rango de velocidades que varían desde 0.052 m/s para una fluidización homogénea, hasta un rango de 0.17 – 1.2 m/s para una fluidización burbujeante, siendo este último régimen el más apropiado para la gasificación de biomasa (9).

Para simular el comportamiento de la arena fluidizada se utiliza el modelo de presión de sólido de Gidaspow, con valores de 1 Pa para el Módulo de Elasticidad de Referencia y 200 para el Módulo de Compactación. La interacción gas-sólido fue modelada según la fuerza de arrastre propuesta por el mismo autor (5). Se utilizó el modelo de turbulencia *k-ε* para la fase gaseosa, y el de Cero Ecuación para la fase dispersa.

La transferencia de turbulencia entre fases se realiza a través del modelo de Sato, para tomar en cuenta el efecto de las burbujas (7).

Se realizó un cálculo de estado transitorio, de precisión RMS 5 x 10^{-4}, con un paso adaptativo de orden 2 x 10^{-3} s (3), comenzando en velocidades de 0.1 m/s, hasta 1.0 m/s. La malla tridimensional del dominio constó de 14000 tetraedros.

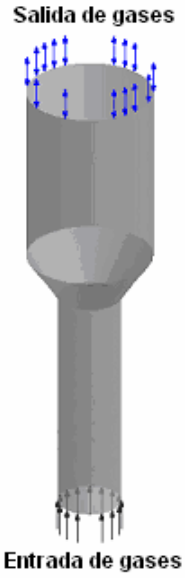

Fig. 4. Dominio del fluido para el estudio hidrodinámico.

La simulación arrojó que la fluidización burbujeante comienza para valores de velocidades de 0.2 m/s, mientras que para valores mayores de 0.8 m/s se muestran signos de destrucción del lecho por arrastre, pues la velocidad del aire en el cuerpo superior es aún superior a la velocidad mínima de fluidización, provocando elevación de la arena más allá de la sección cónica, con el consiguiente transporte de los granos hacia el exterior del reactor (Figura 5).

Aumentando el ángulo del ensanchamiento es posible abarcar un mayor rango de velocidades de trabajo, pero aumenta también la deposición de partículas de arena en la superficie inclinada.

Se obtuvo que el régimen se estabiliza en aproximadamente 2 s, para el primer caso, y 1 s para el último.

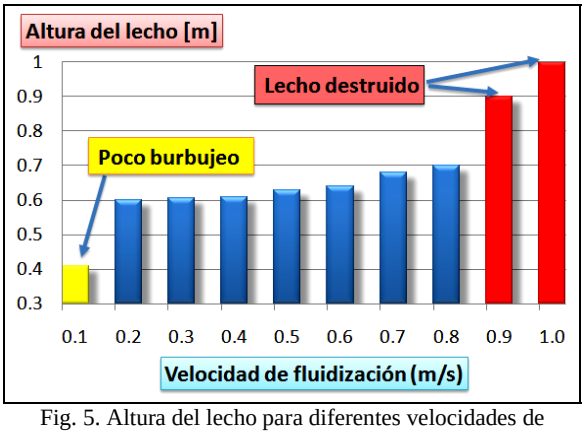

Fig. 5. Altura del lecho para diferentes velocidades de fluidización.

Independientemente de la velocidad del régimen, la simulación arrojó una diferencia de presión provocada por el lecho de cerca de 0.087 atm, máxima en el fondo del lecho. Dicha diferencia se mantiene aproximadamente constante en el tiempo, consecuente con la literatura (5, 9) (Figura 6), aunque se observa una mayor dispersión en la Figura 6b, provocada por la mayor agitación a la que están sometidas las partículas.

La Figura 7 muestra una serie de imágenes exponiendo la distribución de arena para diferentes valores de velocidades. Puede observarse la columna de burbujeo central, que se hace más definida para velocidades más altas, así como también es evidente la gran agitación presente en el lecho bajo estas condiciones.

Un aspecto a notar es que a medida que aumenta la velocidad, la superficie superior del lecho deja de ser horizontal, poniéndose de manifiesto zonas más altas, donde existe mayor burbujeo, así como depresiones, por donde reingresa al lecho la arena impulsada por la burbuja de aire. Estas zonas son más inestables a medida que aumenta la velocidad, moviéndose alrededor de la pared y cambiando su altura y forma constantemente.

5. Conclusiones.

El estudio termomecánico en la geometría propuesta puso de manifiesto un predominio de los efectos de dilatación térmica de los materiales, de 1 a 8 mm, principalmente en el cuerpo inferior del reactor, lo que debe ser tenido en cuenta para el diseño del equipo. La propuesta de espesores de pared, así como las restricciones de soporte a través de la brida de sujeción resultan adecuadas, por cuanto las deformaciones por concepto de solicitación mecánica son despreciables.

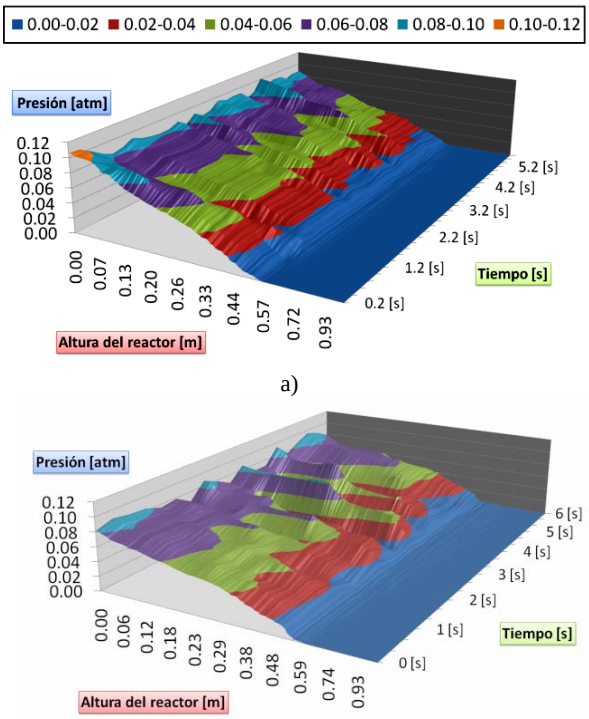

Fig. 6. Evolución de la distribución vertical de presiones para velocidad de fluidización de: a) 0.2 m/s y b) 0.8 m/s.

Para la selección de los materiales de construcción debe seguirse un criterio técnico – económico, pero se recomienda utilizar aceros de mayor calidad para el enlace troncocónico y el cuerpo inferior del reactor, por estar sometidos a condiciones de trabajo más severas, bajo la acción mecánica de la arena y las altas temperaturas de la combustión.

A través de un estudio hidrodinámico fue posible determinar el rango de velocidades de trabajo del reactor, resultando menor que el rango teórico, producto de la geometría y la cantidad de arena propuestas. Estas condiciones pueden estar sujetas a cambios a través de futuros estudios. Fue posible también comprobar la diferencia de presión provocada por el lecho fluidizado, coincidiendo su forma y comportamiento con la descripción de la literatura. Se observaron efectos esperados, como el incremento de la altura del lecho para mayores velocidades del gas, así como se evidenció la presencia de inestabilidades en la columna de burbujeo y la superficie del lecho (10, 12).

Se realizó la modelación exitosa de un flujo bifásico gas-sólido, aplicando modelos provistos por la literatura, y utilizando un software profesional, obteniéndose resultados concretos para la propuesta realizada. La

simulación se llevó a cabo en un ordenador con procesador AMD Athlon 4600++ DualCore a 2 x 2.4 GHz y requirió aproximadamente 2 horas de cálculo por cada segundo de simulación.

6. Bibliografía.

1. ANSYS, Inc. (2005). ANSYS CFX Release 10, Help Files. Canonsburg, Canada. Obtenido de Sitio Web oficial de ANSYS, Inc.: http://www.ansys.com/cfx
2. Belfiore, L. A. (2003). *Transport Phenomena for Chemical Reactor Design.* NewJersey: John Wiley & Sons, Inc.
3. Chung, T. J. (2002). *Computational Fluid Dynamics.* Cambridge: Cambridge University Press.
4. FAO. (1986). *Wood gas as Engine Fuel.* Roma, Italia.
5. Gidaspow, D. (1994). *Multiphase Flow and Fluidisation.* Boston: Academic Press.
6. Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidisation Engineering.* New York: John Wiley & Sons.
7. McComb, W. D. (1992). *The Physics of Fluid Turbulence.* Oxford: Oxford University Press.
8. OPET. (2004). *Small-scale biomass CHP technologies.* Espoo, Finlandia.
9. Ranade, V. V. (2002). *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering.* London: Academic Press.
10. Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (1999). *Mecánica de Fluidos, Novena Edición.* Nueva York: McGraw-Hill.
11. Wen, C. Y., & Yu, Y. H. (1966). Mechanics of Fluidisation. *CFD Simposium Series*, (págs. 100-111).
12. White, F. M. (2003). *Fluid Mechanics.* New York: McGraw-Hill.
13. Wikipedia. (2007). *AISI steel grades*. Obtenido de Enciclopedia Libre Wikipedia: www.wikipedia.org.
14. Wikipedia. (2007). *Arena*. Obtenido de Enciclopedia Libre Wikipedia: www.wikipedia.org

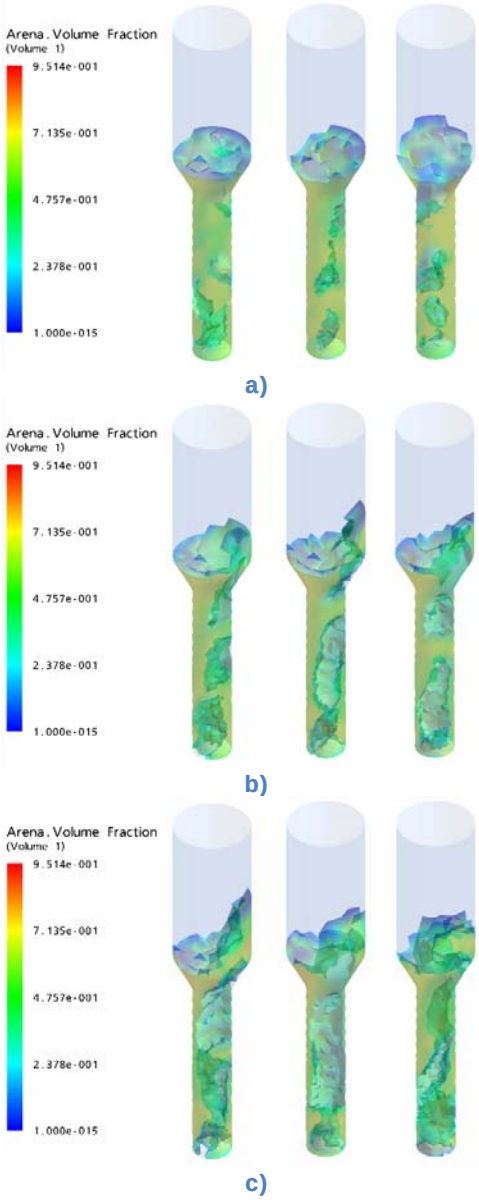

Fig. 7. Distribución de la arena para velocidades de fluidización de: a) 0.2 m/s; b) 0.6 m/s y c) 0.8 m/s.

Mechanic and hydrodynamic study of a fluidized bed gasification reactor.

Abstract.

A Finite Element and CFD simulations were conducted to a prototype of experimental gasifier, starting from a proposed geometry. Thermomechanic aspects are briefed, calculating the reactor deformation, due to its weight and the thermic load. The gas-solid multiphase flow, present on the fluidized bed was also considered, the working range for the pressure and velocity fields were determined and the flow evolution was studied. The drag force and solid pressure models by Gidaspow, and the minimum fluidization velocity criteria, by Wen & Yu and Kunii & Levenspiel were used.

Key words: gasification, fluidized bed, CFD, Finite Element, Multiphase Flow.