

## **ANEXO IV. SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE UN BFB CON ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE MASA Y MOMENTO, Y MEDIANTE MODELIZACIÓN BASADA EN IMPLEMENTACIÓN DE REGLAS.**

Como posibilidad de continuación de este trabajo de tesis en la parte de simulación hidrodinámica, se proponen dos métodos [Perales, 2000], uno es la utilización de modelos basados directamente en las ecuaciones de conservación, y otro basado en la implementación de reglas derivadas de la observación del fenómeno.

### **AIV.1. MODELIZACIÓN BASADA EN ECUACIONES DE CONSERVACIÓN.**

Son las ecuaciones de balances de masa y momento para un sistema de lecho fluido por gas.

En principio el movimiento de un sistema de partículas suspendidas en un fluido está completamente determinado por las ecuaciones de Navier-Stokes, que se han de satisfacer en cada punto del fluido, y las ecuaciones de Newton del movimiento, que han de cumplirse para cada partícula. Sin embargo, cuando el sistema en estudio comprende un gran número de partículas muy cercanas una de otra, como en un lecho fluidizado, el problema se hace demasiado complicado para permitir la solución directa si se especifica en esos términos, por lo que a fines prácticos se hace necesario buscar alguna simplificación que permita su descripción con un reducido número de ecuaciones diferenciales.

Esta simplificación pasa por suponer medios continuos, tanto para el fluido como para el sólido, pasando las ecuaciones de Navier-Stokes del fluido, y la de Newton de las partículas directamente a ecuaciones de un medio continuo representando las ecuaciones del balance de momento para las fases sólida y fluida.

El procedimiento se basa en reemplazar las variables mecánicas puntuales, tales como la velocidad del fluido, la presión del fluido, o la velocidad de la materia sólida de una partícula, por variables medias locales obtenidas promediando las variables puntuales en regiones que contienen muchas partículas, pero son todavía pequeñas comparadas con la escala macroscópica del sistema. La idea de las variables medias locales se ha utilizado en otros sistemas, como por ejemplo en la teoría cinética de los gases.

Usualmente se realizan dos tipos de promediaciones, en el tiempo, y en el espacio. Las variables se consideran formadas por unos valores promedios más las fluctuaciones por dispersiones espacial y temporal de pequeña escala, que desaparecen al integrar en el espacio o el tiempo respectivamente.

Se presentan en la figura AIV.1 unos resultados preliminares, en los que se muestra la formación y crecimiento de una burbuja, con los campos de velocidades asociados.

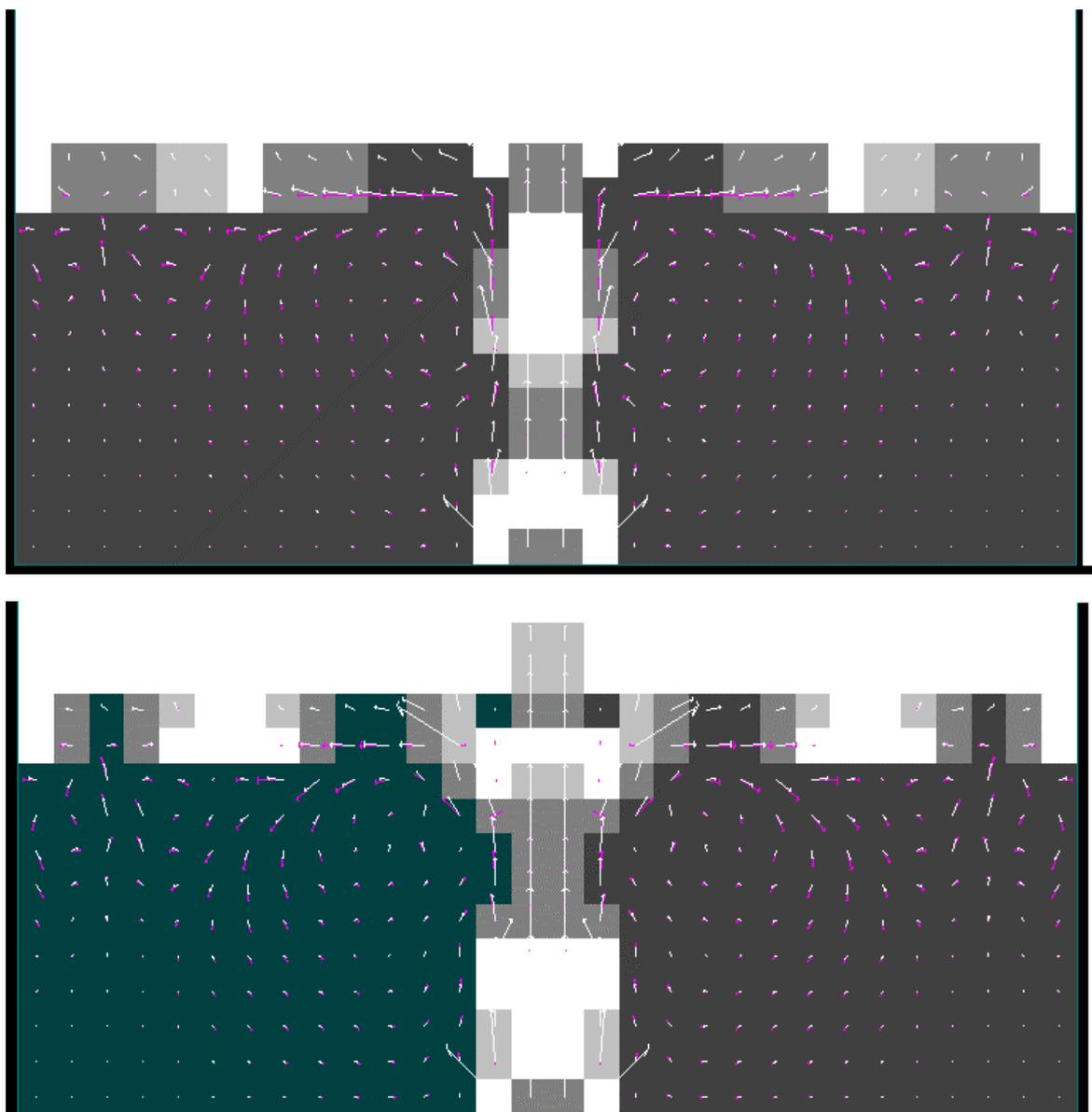


Figura AIV.1 Ejemplo de resultados de simulación para un lecho BFB bidimensional con una entrada de gas.

El tiempo de cálculo es proporcional a  $2x(\text{número de nodos})^3$ . Conforme disminuye el tamaño del nodo los problemas de convergencia se hacen mayores, por lo que se están desarrollando diferentes estrategias que permitan operar con celdas o nodos tan pequeños como sea necesario.

## **AIV.2. MODELIZACIÓN BASADA EN REGLAS.**

En este caso los BFB gas-sólido son tratados con una serie de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evolución del tamaño de las burbujas de gas, parámetro éste que después se utiliza profusamente para la obtención de casi todos los demás parámetros necesarios para simular o calcular un BFB, que son:

- Coeficientes de transferencia de masa y calor.
- Velocidad de ascenso del gas en forma de burbujas (tiempo de residencia del mismo, y por tanto tiempo disponible para llevar a cabo los procesos físicos o químicos deseados).
- Porosidad, fracción de volumen de burbujas en el lecho.
- Flujo visible de gas en forma de burbujas.

de forma que la imprecisión o indefinición de las ecuaciones de cálculo de este parámetro se transmiten a la totalidad de los cálculos o modelos que se basan en él.

Uno de los aspectos claramente mejorables es considerar la existencia de una distribución de tamaño de las burbujas, en lugar de tomar un solo diámetro (que varía a lo largo de la altura del lecho, axialmente), es decir, se puede utilizar un método que genere los diámetros de las burbujas de una forma dinámica en función del estado anterior en el tiempo, dejando que espontáneamente se produzca la coalescencia.

### **PREMISAS EN QUE SE BASA EL MODELO.**

El generador de la formación y variación de tamaño de las burbujas se basa en las siguientes hipótesis:

*Formación o aparición:* Las burbujas se formarían de manera aleatoria una vez superado el caudal correspondiente a la velocidad mínima de fluidización (parámetro que se mantiene, ya que se puede calcular a partir de teorías muy bien fundadas, que enraízan con la ecuación de pérdida de carga para lechos fijos formulada por Ergun). La aleatoriedad se refiere a la posibilidad de que sobre cada uno de los puntos de entrada del distribuidor (sea éste perforado o poroso), haya paso o no de gas. Esto traduciría el hecho de que el paso de gas a través de cada uno de estos puntos vendría gobernado por la diferencia de presión puntual e instantánea entre la entrada y salida de cada uno de estos orificios o poros, y este incremento de presión depende, por ejemplo, de la existencia de burbuja, de las corrientes de gas en la zona anterior al distribuidor, etc., siendo por tanto variable en el tiempo.

*Diámetro de aparición de burbuja:* En el caso del distribuidor perforado, el tamaño de aparición se asimila al del agujero del distribuidor. En el caso de ser del tipo poroso, este tamaño puede ser bastante menor, y viene dado por el incremento de tiempo utilizado en el cálculo.

Hay que diferenciar este diámetro del que se da cuando la burbuja se separa del distribuidor.

*Diámetro de separación:* Es aquél cuya velocidad de ascensión, que viene dada por la ecuación  $u_B = 0.71 (g D_B)^{0.5}$ , también suficientemente comprobada y obtenible a través de un balance de impulso mecánico, es superior a la de crecimiento o desplazamiento de la parte superior de la burbuja debida a entrada de gas. Esto significa que si el gas que entra por un orificio del distribuidor asciende a menor velocidad que la burbuja que pudiera haberse formado en el mismo, la burbuja se separará, ya que el gas no la alcanza.

*Interacciones entre burbujas:* Se supone que el efecto de las aureolas que rodean a las burbujas hacen que éstas sufran un acercamiento acelerado. Los desplazamientos se calculan de forma ponderada a los correspondientes tamaños. Si la línea imaginaria que une los centros de las burbujas es inclinada, se mantiene el ángulo de inclinación hasta la coalescencia.

*Crecimiento de la burbuja:* Una vez se ha separado del distribuidor, la burbuja crece únicamente por coalescencia (no se tiene en cuenta la variación de tamaño que pueda darse debido a la expansión por la

disminución de la presión al ascender en el lecho de partículas). Esta coalescencia se inicia cuando dos burbujas están lo suficientemente cercanas como para que sus aureolas interactúen (caso de que exista esta aureola). La cercanía de las burbujas puede ocurrir en el distribuidor, al ir aumentando de tamaño por el gas entrante en el distribuidor, lo que originaría un acercamiento horizontal, o bien porque dadas dos burbujas de diferente tamaño, la mayor al ascender a mayor velocidad encuentre a su paso a la pequeña (acercamiento vertical). La coalescencia ocurre finalmente cuando intersectan los radios de las mismas.

La implementación en programa se ha hecho fijando como distancia de interacción a una fracción del tamaño de las burbujas, que traduce el efecto del tamaño de las burbujas.

*Formación de pistones o slugging:* Si el tamaño de las burbujas es similar al del tubo, se deforma la burbuja, dando lugar al efecto de slugging. Se ha implementado manteniendo el volumen de la burbuja, y con la formación de elipses.

*Desplazamiento de las burbujas que intersectarían la pared:* se desplazan para que asciendan reptando.

A continuación se representan varias simulaciones para ilustrar los resultados obtenidos con este modelo.

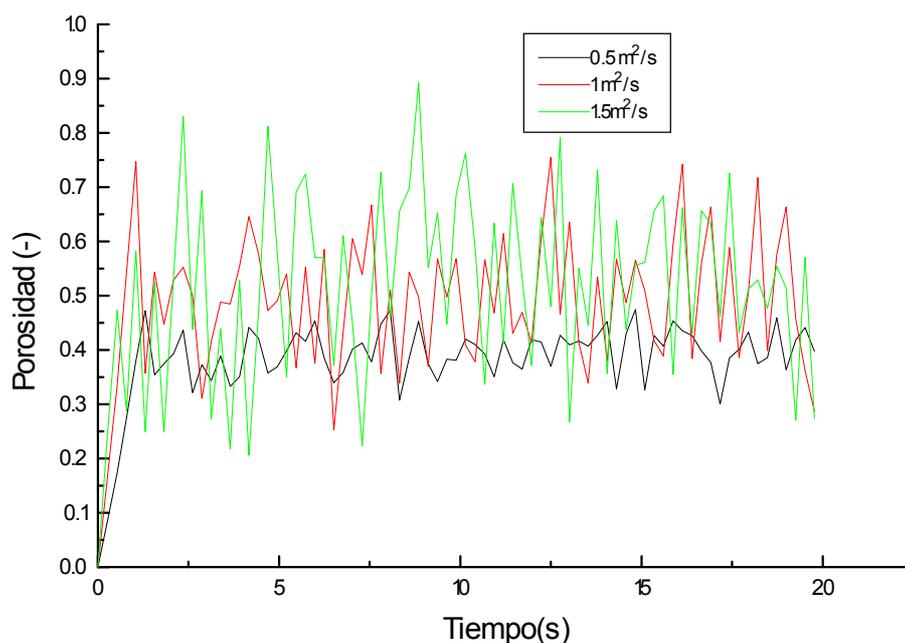


Figura AIV.2. Fluctuaciones de la porosidad en un lecho fluidizado bidimensional para  $U_{mf}=0.4$ . Se considera al lecho en la situación de mínima fluidización.  $u_{mf}$  sólo interviene para el cálculo del tamaño de las nubes de las burbujas. Las fluctuaciones de presión serían la inversa de las de porosidad.

Se observa como la porosidad media aumenta con la velocidad del gas. La frecuencia de las variaciones parece también aumentar.

La apariencia de la distribución de huecos es la de la figura siguiente:

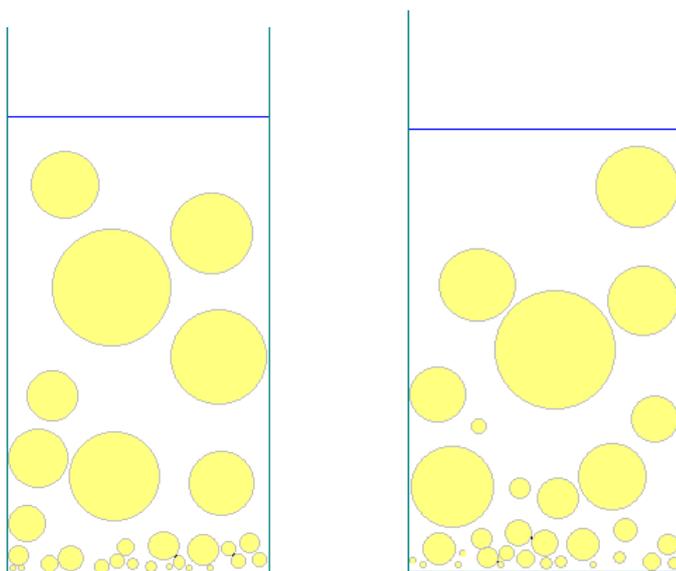


Figura AIV.3. Ejemplos de distribución de tamaños de burbujas obtenida en 2 instantes de tiempo diferentes.

Como conclusión preliminar de esta simulación basada en la implementación de una serie de reglas cabe decir que el tiempo de resolución es muy breve, y por tanto que la introducción de otras nuevas reglas que ayuden a completar el sistema no presenta problemas de cálculo. La apariencia del resultado gráfico obtenido, es en este momento más parecido a un líquido en ebullición que a un lecho de partículas de sólido en suspensión en una corriente ascendente de gas, pero aún así, el valor de la porosidad, de la fluctuación de esta porosidad, y de la evolución de estas burbujas es prometedor.

