



Artículo especial

## Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional a la neumología



Ana Fernández Tena y Pere Casan Clarà\*

Instituto Nacional de Silicosis, Hospital Universitario Central de Asturias, Facultad de Medicina, Universidad de Oviedo, Oviedo, España

### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

#### Historia del artículo:

Recibido el 27 de junio de 2014

Aceptado el 10 de septiembre de 2014

On-line el 22 de enero de 2015

#### Palabras clave:

Dinámica de fluidos computacional

Depósito pulmonar

Aerosol

### R E S U M E N

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se define como la técnica informática que busca la simulación del movimiento de los fluidos. Las principales ventajas de la técnica de CFD sobre otro tipo de estudios de mecánica de fluidos son la reducción sustancial de tiempo y costes en los experimentos, la posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente, como es el caso de las vías aéreas, y un nivel de detalle prácticamente ilimitado. Utilizamos el programa de CFD Ansys-Fluent para elaborar un modelo de la vía aérea de conducción que permite la simulación de distintos caudales de flujo inspiratorio, así como del depósito de partículas inhaladas de diferentes diámetros, obteniendo resultados concordantes con la literatura existente utilizando otros procedimientos. De este modo se pretende abrir una nueva vía a la individualización de los tratamientos para las distintas patologías respiratorias.

© 2014 SEPAR. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

### Use of Computational Fluid Dynamics in Respiratory Medicine

#### A B S T R A C T

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a computer-based tool for simulating fluid movement. The main advantages of CFD over other fluid mechanics studies include: substantial savings in time and cost, the analysis of systems or conditions that are very difficult to simulate experimentally (as is the case of the airways), and a practically unlimited level of detail. We used the Ansys-Fluent CFD program to develop a conducting airway model to simulate different inspiratory flow rates and the deposition of inhaled particles of varying diameters, obtaining results consistent with those reported in the literature using other procedures. We hope this approach will enable clinicians to further individualize the treatment of different respiratory diseases.

© 2014 SEPAR. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

#### Keywords:

Computational fluid dynamics

Lung deposit

Aerosol

### Introducción

Las técnicas de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* [CFD]) son de gran interés en la investigación neumológica actual. La *Food and Drug Administration* (FDA) anunció en 2012 un proyecto de investigación titulado «Modelos predictivos del depósito pulmonar para la eficacia y seguridad de fármacos inhalados». Su objetivo principal era desarrollar un modelo de CFD de medicación inhalada que permitiese explicar las características y los parámetros fisiológicos del depósito pulmonar de los fármacos. En los últimos congresos mundiales de CFD, su aplicación a la medicina ha tenido una presencia cada vez mayor. Por

ejemplo, el congreso «Bio-engineering» en 2003 únicamente contó con una comunicación dedicada al estudio de la circulación sanguínea, mientras que en 2007 se presentaron 7 comunicaciones dedicadas a la circulación y 5 centradas en la respiración.

La CFD se define como la técnica informática que busca la simulación del movimiento de los fluidos. Es una rama de la mecánica de fluidos que emplea métodos numéricos y algoritmos para analizar y resolver los problemas que implican a los flujos de los fluidos. Comprende una gran variedad de ciencias, como las matemáticas, la informática, la ingeniería o la física, las cuales van a trabajar conjuntamente para proporcionar los medios para modelar fluidos<sup>1</sup>. La creciente potencia de cálculo de los ordenadores, así como su menor precio, han permitido el progreso de la CFD, en la que las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas bajo el dominio a estudio. Estas ecuaciones son las que gobiernan el movimiento de los fluidos y fueron descubiertas hace más de 150 años simultáneamente

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: pcasan@ins.es (P. Casan Clarà).

por el ingeniero francés Claude Navier y el matemático irlandés George Stokes. Se derivan de las leyes del movimiento de Newton y son las mismas para cualquier flujo. Su resolución permite conocer la velocidad y la presión de un fluido en cualquier punto del espacio, y por lo tanto también su comportamiento. La particularización a los casos concretos viene definida por las denominadas condiciones de contorno y por los valores iniciales que se señalen. Estas ecuaciones son lo suficientemente complejas como para que su solución analítica solo sea posible en casos muy elementales, y por ello es imprescindible disponer de software avanzado diseñado para el tratamiento y la resolución de estos datos.

Las ventajas que proporciona el análisis por CFD se pueden resumir en: reducción sustancial de tiempos y costes en los nuevos diseños, posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente, y un nivel de detalle prácticamente ilimitado.

Considérese, por ejemplo, el flujo del aire en las vías aéreas. Junto con las ecuaciones, hay que introducirle al programa de CFD las condiciones iniciales y de contorno referentes a las variables y a la superficie sólida. Las condiciones referentes a las variables vienen definidas por la velocidad y la presión del aire, y las condiciones de las superficies sólidas por la forma de las vías aéreas, expresada matemáticamente en coordenadas. Para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes globalmente en la vía aérea, el programa primero debe resolverlas en un número finito de puntos del espacio. Por eso, lo primero que hay que hacer es representar el pulmón mediante lo que se conoce como una malla de cálculo; cuanto mayor sea el número de puntos de esta malla, mayor será la precisión y realismo de la simulación y más difícil de generar y resolver. En casos con geometría compleja, esta fase puede ocupar días e incluso semanas.

### Confección del modelo geométrico de la vía aérea

Para la elaboración del modelo tridimensional de la vía aérea se ha optado por seguir el diseño propuesto por Kitaoka et al.<sup>2</sup>, complementado con el de Weibel<sup>3</sup>. El modelo clásico de Weibel<sup>3</sup> indica los modos de bifurcación de la vía aérea. En él se designa a la tráquea como la primera vía aérea (orden 0), y presume que cada vía aérea da origen a 2 ramificaciones (dicotomía regular). Así, los bronquios principales izquierdo y derecho son de orden 1, y hay un mínimo de 23 generaciones bronquiales hasta los conductos alveolares. Por lo tanto, existirían  $2^{23}$  (8.388.608) vías aéreas de orden 23, lo cual resulta fácil de imaginar que es prácticamente imposible de simular mediante técnicas de CFD sin realizar algún tipo de simplificación. El diámetro de cada ramificación disminuye según la fórmula  $d_z = d_0 \cdot 2^{-z/3}$ , donde  $z$  es el orden de la generación de vía aérea y  $d$  su diámetro. Esta relación se mantiene hasta la generación 16 (vía aérea de conducción). A partir de la generación 17 existen pocos cambios en las dimensiones de la vía respiratoria, ya que las vías están más o menos alveolizadas (vía aérea transicional y zona respiratoria).

En el modelo de Weibel<sup>3</sup> no se tuvo en cuenta la disposición espacial de las ramificaciones, por lo que para realizar un modelo tridimensional de la vía aérea es necesario ampliar sus indicaciones con las de otros trabajos más recientes. Kitaoka et al.<sup>2</sup> consiguieron diseñar un modelo tridimensional realista del pulmón, elaborado a través de 9 reglas básicas, las cuales indican los ángulos y planos de bifurcación entre ramas, la relación entre el diámetro de una rama madre y sus ramas hijas, la longitud de las ramas, etc. Basándose en estas normas se confeccionó el modelo geométrico del árbol bronquial hasta la generación 16 de la vía aérea con el programa Gambit, que forma parte del paquete de simulación CFD denominado Ansys-Fluent<sup>4</sup>. El modelo completo hasta el final de la vía aérea de conducción constaría de un total de 65.536 bronquiolos terminales, lo cual implica tiempos de cálculo elevadísimos

para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en el mismo y hace necesaria su simplificación. Para ello se introdujo una mejora en el programa a través de lo que se conoce como una función definida por el usuario (*User Defined Function* [UDF]). Esta UDF consiste en un nuevo código especialmente desarrollado para la vía aérea que permite simular globalmente el comportamiento del aire en las 65.536 ramas del modelo completo, trabajando únicamente con 8 ramales. Para ello es necesario imponer las condiciones de contorno de las ramas desarrolladas en sus homólogas truncadas. Por lo tanto, lo que sucede con el aire en la rama desarrollada se aplica a su homóloga truncada. En la figura 1 se muestra el aspecto del modelo desarrollado únicamente con 8 ramales. Este tipo de modelo parcialmente desarrollado ha sido investigado por varios grupos de trabajo<sup>5-8</sup>, demostrando ser un método efectivo para la simulación de la vía aérea completa ahorrando costes computacionales.

A este modelo además se le añadió la vía aérea superior (nariz, boca y región faringolaríngea) para completar toda la vía aérea de conducción. La nariz (fig. 2A) es un modelo simplificado del empleado por Castro-Ruiz<sup>9</sup>. El modelo fue desarrollado a partir de imágenes de cortes coronales obtenidos por tomografía computarizada (TC), cuyos perímetros han permitido la reconstrucción de las superficies longitudinales. La boca (fig. 2B) y la región faringolaríngea (fig. 2C) son una reproducción del modelo de Stapleton et al.<sup>10</sup>.

Para la construcción de la boca se siguieron los mismos pasos que con la nariz. La geometría de la región faringolaríngea es más compleja, puesto que sus 3 orificios de entrada (las 2 coanas de las fosas nasales y el istmo de las fauces en la boca) deben fusionarse en un único conducto (la región faringolaríngea), cuya salida es la tráquea. El modelo completo de la vía aérea de conducción, desde la nariz y la boca hasta la generación 16 bronquial, se presenta en la figura 3.

### Preparación del modelo numérico

#### Mallado

Es una parte fundamental del proceso, ya que de ella depende la correcta resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Se parte del modelo geométrico antes descrito y se trata de dividirlo en celdas lo más regulares posible. Dada la morfología de las vías aéreas, la forma geométrica que mejor se adapta para realizar el mallado es el tetraedro. Las dimensiones de dichos tetraedros han de ser acordes a las dimensiones de los conductos y su forma ha de cumplir unos requisitos para que las ecuaciones se puedan resolver en ellas: tetraedros muy deformados o con mucha diferencia de tamaño entre zonas vecinas hacen que los resultados puedan ser incorrectos. Este proceso de mallado se realiza también con el programa Gambit del paquete Ansys-Fluent<sup>4</sup> de CFD. Como resultado del proceso se obtienen aproximadamente un millón de celdas. Otros mallados con mayor y menor número de celdas fueron testados, comprobándose que un millón de celdas es un número adecuado para este modelo de la vía aérea, permitiendo reducir costes computacionales sin perder calidad de la información. Varios detalles del modelo con el mallado se presentan en la figura 4A,B.

#### Condiciones de contorno

La resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para cada problema depende de las condiciones iniciales y de contorno referentes a las variables (en este caso, la velocidad y la presión del aire) y a la superficie sólida (el modelo geométrico de la vía aérea). Hay que indicarle al programa Fluent del paquete de CFD Ansys-Fluent<sup>4</sup> cuál va a ser la superficie de entrada del aire en el modelo (los orificios nasales o la boca) y cuáles van a ser las superficies de salida (los

Download English Version:

<https://daneshyari.com/en/article/4203226>

Download Persian Version:

<https://daneshyari.com/article/4203226>

[Daneshyari.com](https://daneshyari.com)