

Optimización de los sistemas de ventilación para disminuir el riesgo de infección nosocomial por vía aérea

Villafruela Espina JM, Castro Ruiz F, San José Alonso JF, Sierra Pallarés JB, Santiago P
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. Valladolid.
e-mail: manolo@eii.uva.es

Resumen

Objetivo: Elaborar una metodología que permita predecir y comparar la capacidad de los sistemas de ventilación de las habitaciones de hospitalización de aislados y de quirófanos para disminuir las tasas de infecciones nosocomiales por vía aérea.

Métodos: Como herramienta predictiva se emplea la dinámica de fluidos computacional (CFD) que permite analizar el flujo de aire y la dispersión aérea de patógenos en quirófanos y habitaciones de aislamiento. Para validar la herramienta numérica se realizan ensayos experimentales en laboratorio con condiciones controladas.

Resultados: Una elección y colocación adecuadas de los difusores y de las rejillas de retorno puede disminuir significativamente la concentración de partículas infecciosas en el aire de una habitación. En quirófanos de flujo unidireccional, el efecto de barrido que se pretende conseguir se ve alterado por la presencia de elementos como lámparas, monitores o el personal que rodea la mesa de operaciones, lo que repercute en la tasa de deposición de partículas sobre la herida quirúrgica.

Conclusiones: La CFD permite predecir el patrón de flujo de aire en un recinto y con él la dispersión y deposición de partículas infecciosas. La posición de las entradas y salidas de aire afecta significativamente a la distribución espacial de partículas en la habitación, verificando que la hipótesis de dispersión homogénea y uniforme de contaminante no es asumible.

La implantación de quirófanos de flujo unidireccional debe ir acompañada de una correcta elección del aparataje que se interpone entre la salida de aire y la mesa de operaciones.

Patrones de flujo de aire eficientes pueden ayudar a disminuir el riesgo de infección por vía aérea sin aumentar el número de renovaciones hora de aire y, por tanto, sin penalizar la eficiencia energética.

Palabras clave: Ventilación, Habitación de aislados infecciosos, Quirófano, Mecánica de fluidos computacional.



Optimisation of ventilation systems to reduce the risk of airborne nosocomial infection

Abstract

Objective: To devise a methodology which makes it possible to predict and compare the capacity of ventilation systems in isolation room and operating theatres to reduce the rates of airborne nosocomial infection.

Methods: We have used Computational Fluid Dynamics (CFD) as a predictive tool, something which allows us to analyze the air flow and airborne dispersion of pathogens in operating theatres and isolation rooms. To validate the numerical tool, experimental laboratory test were performed under controlled conditions.

Results: An adequate selection and placement of the diffusers and return grilles may significantly reduce the concentration of infectious particles in the air of a room. In operating theatres with a unidirectional flow, the desired wipe effect was seen to be altered by the presence of elements such as lights, monitors or hospital personnel surrounding the operating table, something which impacts on the rate of deposition on the surgical wound.

Conclusions: CFD enables us to predict air-flow patterns in a room and, thus, the dispersion and deposition of infectious particles. The position of air inlets and outlets significantly affects the spatial distribution of particles in the room, thus verifying that the hypothesis of homogeneous and uniform dispersion cannot be confirmed. The introduction of one-way flow operating theatres should be accompanied by a correct choice of equipment located between the air outlets and operating table.

Efficient air flow patterns may help to reduce airborne risk of infection without increasing the number of air renewals per hour and, therefore, without penalising energy efficiency.

Key words: Ventilation; Isolation room; Operating theatre; Computational fluid dynamics.

Introducción

Las infecciones nosocomiales contribuyen de forma importante a la morbilidad y mortalidad, además de incrementar los costes y tiempos de hospitalización. Un estudio reciente en hospitales europeos¹ cifra en 14,6% el porcentaje de muertes en pacientes hospitalizados causadas por una infección nosocomial (con certeza 6,6% y

con elevada probabilidad el 8%). Según el mismo estudio, las infecciones del tracto respiratorio inferior y en la herida quirúrgica son responsables de 39% y del 14%, respectivamente, de todas las infecciones nosocomiales de estos pacientes. Tanto las infecciones del tracto respiratorio inferior como de la herida quirúrgica se deben en su mayoría a microorganismos aerotransportados.



Está probado² que la transmisión y propagación de enfermedades infecciosas en ambientes interiores está relacionada con la ventilación y las direcciones del flujo de aire. La transmisión por vía aérea se produce cuando se diseminan en el aire aerosoles o partículas en el rango de tamaños respirables, conteniendo agentes infecciosos que permanecen activos en la distancia y en el tiempo. Transportados de esta forma, algunos microorganismos (por ejemplo, *Aspergillus* y *Mycobacterium tuberculosis*) pueden transportarse a grandes distancias gracias a las corrientes de aire y ser inhalados por personas susceptibles sin haber tenido contacto directo, incluso sin haber permanecido en la misma habitación que el individuo infectado. Otros agentes infecciosos (por ejemplo, virus de la gripe, rinovirus, norovirus o rotavirus) pueden transmitirse vía pequeños aerosoles pero solo a distancias cortas, lo que sugiere que estos agentes no sobreviven en el aire durante largos periodos³. El número de microorganismos infecciosos presentes en cada gota o partícula es variable. También lo es el número de microorganismos que es necesario inhalar para contraer la enfermedad.

La investigación realizada se enmarca en un campo de marcado carácter multidisciplinar: la ingeniería hospitalaria. Se precisa del conocimiento agregado de campos de la fluidomecánica, la climatización y la medicina preventiva para avanzar en la solución de uno de los problemas de morbilidad y mortalidad más importantes en el ámbito hospitalario, además de los consiguientes costes para los sistemas de salud. Se pretende disponer de una herramienta que prediga la ventilación en el interior de quirófanos y habitaciones de aislados y que además cuantifique la efectividad del sistema.

En este proyecto se ha elaborado una metodología predictiva que permite determinar las características de los sistemas de ventilación de las habitaciones de hospitalización de aislados y de quirófanos, para disminuir las tasas de infecciones nosocomiales por vía aérea, a los pacientes, al personal sanitario y a los acompañantes.

La ventilación en estos locales debe realizar las siguientes funciones:

- Diluir los gérmenes generados en el local mediante un número adecuado de renovaciones hora de aire.
- Evitar la transferencia de aire entre las salas contiguas usando diferentes presiones de aire.
- Crear un patrón de flujo que desplace el aire contaminado lejos de las zonas ocupadas.
- Proporcionar un ambiente confortable, controlando la temperatura, la humedad y la velocidad del aire.
- Minimizar la deposición de partículas sobre la herida quirúrgica y la mesa de instrumental durante la intervención quirúrgica.

La ventilación de estos locales está caracterizada por la distribución del local, la disposición y número de las entradas y salidas de aire en el local; la disposición del mobiliario; el sistema de difusión utilizado y la emisión de los contaminantes.

Los parámetros que permiten evaluar la ventilación son la eficiencia de intercambio de aire, la eficiencia de renovación del contaminante, la edad del aire, las partículas portadores de virus y bacterias y deposición de partículas sobre superficies sólidas. Estos con-



ceptos son utilizados en quirófano para analizar la deposición de partículas sobre la herida quirúrgica y la mesa de instrumentación.

Método

La metodología se basa en simulaciones con ordenador que se validan con datos experimentales. Después de realizar medidas en tres áreas quirúrgicas y ocho habitaciones de hospitalización para pacientes aislados, con anemómetro de ultrasonidos y gases trazadores, se concluyó que era necesario disponer de datos experimentales bajo condiciones controladas para poder validar las predicciones numéricas. Se han construido dos instalaciones experimentales que permiten obtener datos fiables. Una de las instalaciones se corresponde con un modelo a escala de un quirófano laminar. Se utiliza como técnica de medida la Velocimetría de Imágenes de Partículas (Particle Image Velocimetry-PIV) para determinar el campo de velocidades (Figura 1).

En el caso de quirófanos de flujo turbulento y habitaciones de aislados, se

emplean difusores para difundir el aire dentro del recinto. El patrón de flujo de aire dentro de estos recintos, y por tanto la dispersión de contaminantes exhaladas, está muy influenciado por el tipo de difusor. Si se quiere que el modelo numérico prediga correctamente esta dispersión de contaminantes es preciso asegurarse de que el difusor está correctamente simulado. Se ha construido una instalación a escala real para medir el campo de velocidades de un difusor rotacional. Se emplea la técnica de la anemometría de ultrasonidos 3D. Estos datos experimentales se usan para validar el modelo numérico.

Medidas experimentales

En una primera etapa y en colaboración con la Dirección General de Infraestructuras de la Sanidad de Castilla y León, se hicieron medidas experimentales en quirófanos y habitaciones de paciente aislado en varios hospitales de Castilla y León.

Posteriormente se construyeron dos instalaciones experimentales en la Escuela de Ingenieros Industriales. Una a escala 1:7 de un quirófano laminar con

Figura 1. Esquema de la instalación a escala de quirófano laminar

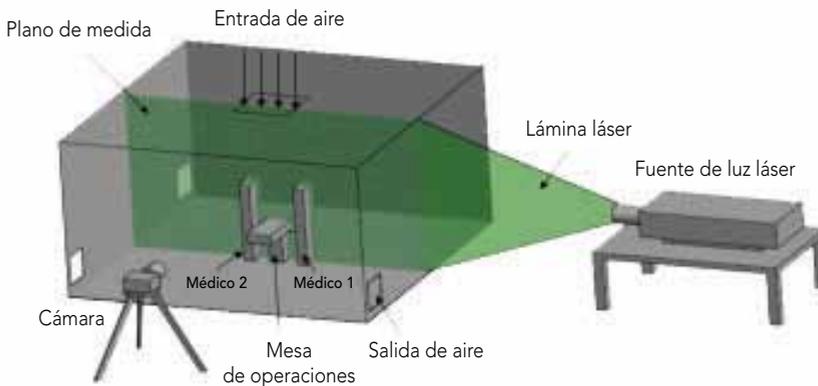
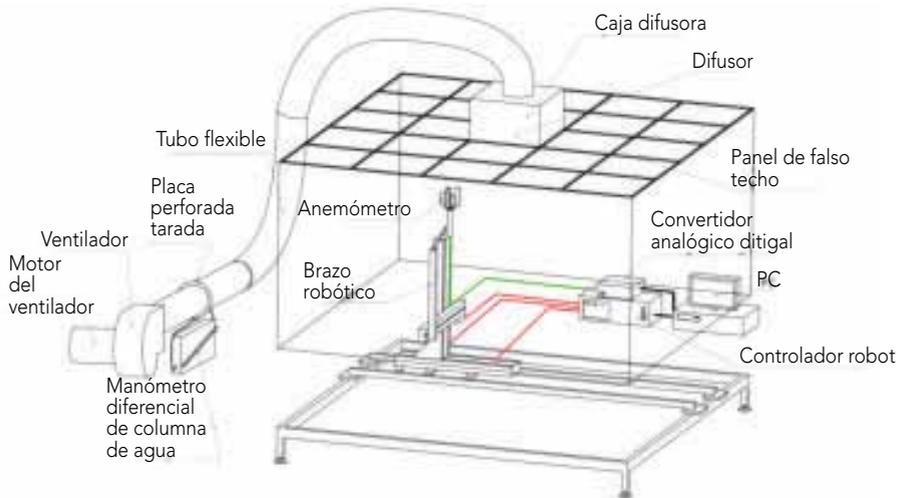




Figura 2. Instalación a escala real para caracterizar difusores de aire con anemometría de ultrasonidos



mesa de operaciones y médicos (Figura 1) y otra a escala natural para caracterizar difusores de aire (Figura 2).

En la instalación del quirófano laminar se utiliza la velocimetría de imágenes de partículas (*Particle Image Velocimetry-PIV*), es una técnica no intrusiva utilizada para medir la velocidad de un fluido en todo un plano simultáneamente a través de la medida de la velocidad de las partículas inmersas en él.

En la instalación de difusores se emplea la anemometría de ultrasonidos tridimensional que permite medir simultáneamente los tres componentes de la velocidad del aire.

Validación del código numérico

Los datos experimentales obtenidos en estas instalaciones se han utilizado para la validación del modelo numérico. En la Figura 3 se representa una comparativa de las medidas experimentales (mitad izquierda) y las pre-

dicciones numéricas (mitad derecha) para la zona encima de la mesa de operaciones en el modelo de quirófano de flujo laminar. Los diferentes tonos representan la velocidad del aire adimensionalizada, y las líneas son líneas de corriente.

La Figura 4 muestra la comparación entre datos experimentales y numéricos para el flujo de aire generado por un difusor de tipo rotacional. Las tonalidades corresponden con valores la velocidad del aire y las líneas son líneas de corriente.

Desarrollo del modelo numérico

Una vez obtenido el patrón de flujo de aire en la habitación o el quirófano se han cuantificado algunos parámetros de eficiencia de la ventilación como: *Eficiencia de intercambio de aire*, este parámetro es un cociente entre el tiempo que se tardaría en renovar el aire de la sala de forma ideal (flujo de pistón) y el tiempo que en la práctica se tarda en renovar el aire. *Eficiencia*



Figura 3. Comparativa experimental-numérica del campo de velocidades encima de la mesa de operaciones

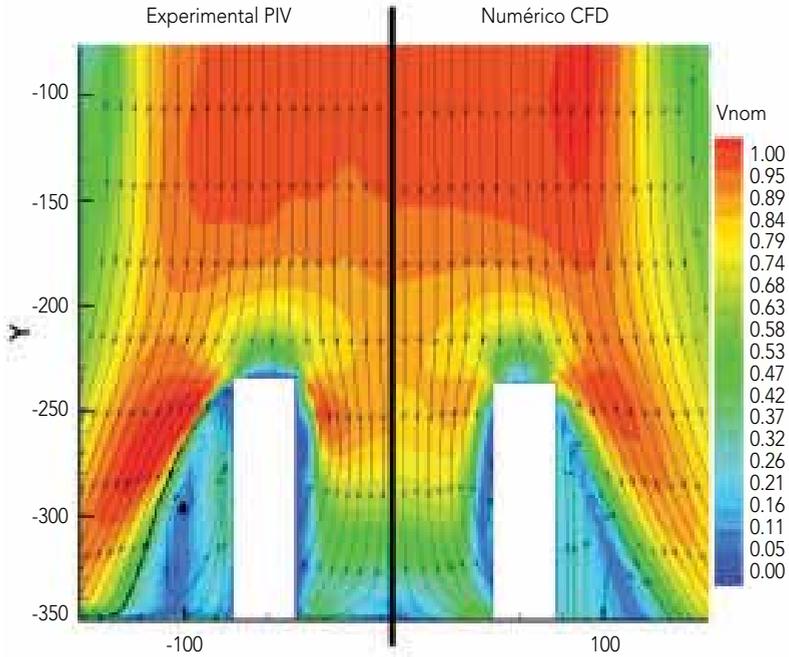
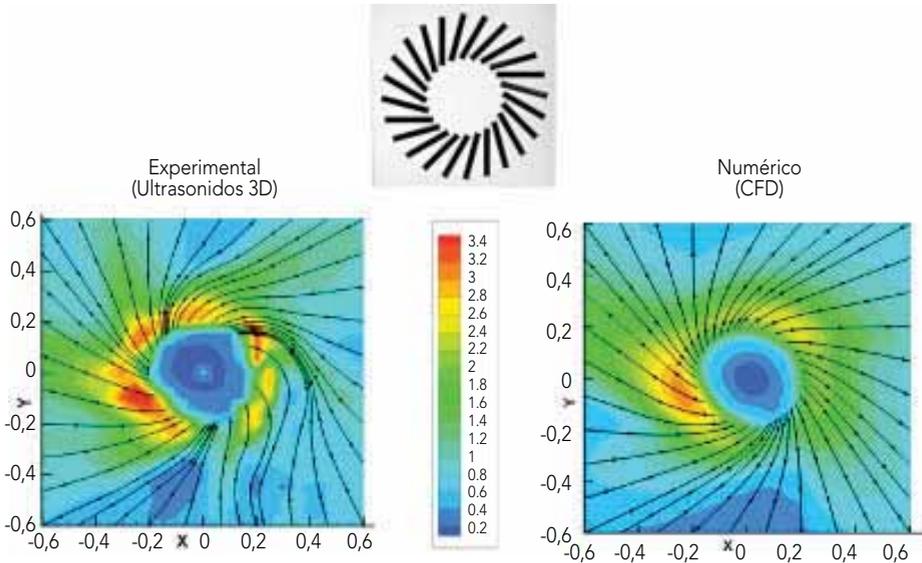


Figura 4. Comparativa experimental-numérica del campo de velocidades generado por el difusor de aire rotacional





de renovación del contaminante, este parámetro cuantifica la calidad con la que se evacua un determinado contaminante en el recinto. *Edad del aire*, la edad de una partícula de aire será el tiempo que ha pasado desde el momento en el que la partícula pasa por el punto de referencia hasta que pasa por el punto de medida.

El modelo de dispersión de partículas tiene en cuenta la deposición sobre superficies y la mortalidad de los microorganismos aerotransportados.

Resultados

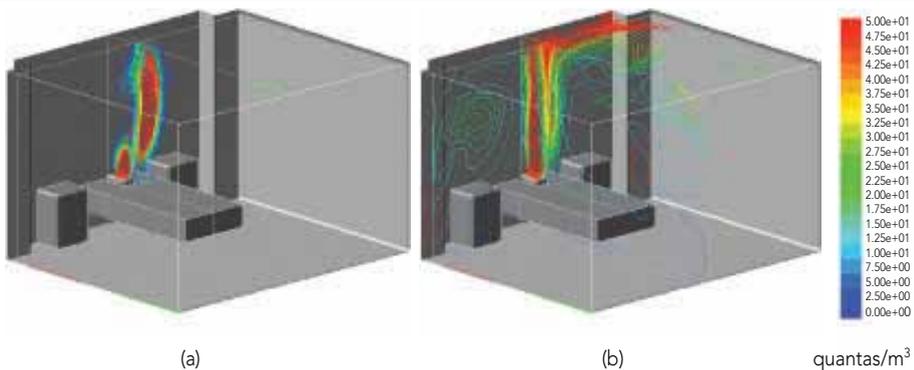
Los diferentes modelos realizados y validados con datos experimentales permiten el análisis de diferentes disposiciones y elementos como el difusor y la difusión de contaminantes, lo que posibilita establecer criterios claros de diseño en función del patrón de flujo de cada caso, este análisis permitirá realizar recomendaciones y descartar soluciones constructivas, antes de realizar la instalación real, reduciendo las infecciones nosocomiales, y que el diseño y ejecución de este tipo de sistemas de ventilación tenga más posibilidades de lograr los requerimien-

tos de calidad de ambiente interior de este tipo de locales.

En concreto, se ha analizado cómo influye la posición de los difusores en la dispersión de partículas infecciosas en una habitación de aislados de uso individual analizado 13 configuraciones de entradas y salidas de aire. En todas ellas, el difusor de aire es de tipo recto, es decir, el flujo de aire es normal al difusor. El caudal de ventilación es equivalente a 12 renovaciones de aire a la hora. La habitación está en depresión respecto de la antesala, por lo que hay entrada de aire desde la antesala hacia la habitación por la holgura de la puerta de entrada a ras de suelo. El baño está en depresión respecto de la habitación. Un caudal equivalente a 2 RH se extrae por el baño a través de la holgura de su puerta y el resto (10 RH más el caudal que entra de la antesala) se extrae en la misma habitación.

El paciente, durante la exhalación, emite por la boca una unidad de infección (quanta) por segundo. Se tiene en cuenta la deposición de partículas sobre superficies y su viabilidad, puesto que la capacidad de infección decrece con el tiempo. En la Figura 5 se mues-

Figura 5. Concentración de quantas en una habitación de aislados infecciosos con dos posiciones diferentes de las entradas y salidas de aire





tran los resultados de la concentración quantas para dos configuraciones de entradas y salidas de aire de un total de 13 configuraciones estudiadas. En todos los casos estudiados, el aire contaminado tiende a ascender debido a la pluma térmica generada por el propio paciente. La presencia de una extracción encima del paciente (Figura 5a) favorece la eliminación del contaminante exhalado, aunque esta afirmación no es generalizable a cualquier tipo de difusor.

Para cuantificar la capacidad de evacuar el aire contaminado se utiliza el concepto de eficiencia de renovación de contaminante, en este caso patógenos activos o quantas de infección. Con la configuración de la Figura 5a, la eficiencia de renovación de contaminante es diez veces superior a la de la figura 5b.

Los resultados anteriores ponen en evidencia que la posición del difusor y de las extracciones de aire es importante, pero también lo es el tipo de difusor. El difusor recto de los casos anteriores descarga el aire perpendicularmente, mientras que un difusor rotacional o uno cuadrado de lamas inclinadas producen flujos casi horizontales y pegados al techo debido al efecto Coanda. Esto hace que el patrón de flujo y la dispersión del contaminante exhalado por el paciente cambien notablemente con uno u otro difusor.

En cuanto al quirófano, el modelo numérico validado se utiliza para comparar diferentes configuraciones de ventilación en un quirófano. Se considera una habitación con unas dimensiones de 6,8 m x 6,6 m con una altura de 2,8 m. Dentro de la sala, se esquematiza la disposición que habría en una operación real. En el centro de la habi-

tación se sitúa una camilla de 2 m x 0,5 m, al lado de la camilla se colocan tres personas y se disponen dos mesillas auxiliares a ambos lados de la camilla. Además, un anestésista y una mesa auxiliar se sitúan en la cabecera. Sobre el tercio superior de la camilla, se colocan dos lámparas semiesféricas.

En el quirófano laminar, la entrada, que estará centrada en la habitación, tiene unas dimensiones de 12 m² (3 m x 4 m). La velocidad de impulsión se establece en 0,18 m/s, equivalente a 62 ACH, de manera que 20 serían de aire del exterior y las 42 restantes provienen de aire recirculado pero filtrado. En el quirófano turbulento se disponen cuatro difusores rotacionales situados en las esquinas de un rectángulo de 3 m x 4 m. Los difusores están formados por 24 ranuras de dimensiones 0,028 m x 0,152 m, que permiten la salida de aire con un ángulo de 45°. Las salidas de aire tienen la misma disposición en ambos quirófanos.

El principal parámetro que se analiza es la deposición de partículas sobre la herida quirúrgica y la mesa de instrumental. Se hace la hipótesis de que cada persona emite una unidad de infección (quanta) por segundo. La distribución de quantas en el aire del quirófano y su deposición sobre superficies dependerá del patrón de flujo de aire. En el quirófano de flujo por mezcla, quirófano turbulento, la distribución de quantas es más homogénea y la deposición sobre la herida y la mesa de instrumental es prácticamente independiente de la fuente de contaminante origen del contaminante (tabla 1). En el quirófano unidireccional (quirófano laminar) el flujo de aire produce un efecto de barrido sobre las partículas emitidas por el anestésista, alejando las partículas de la herida



Tabla 1. Deposición de contaminante (x 104 quanta/s) sobre la herida quirúrgica y la mesa de instrumental

Origen	Herida		Mesa instrumental	
	Turbulento	Laminar	Turbulento	Laminar
Médico 1	1,54	4,00	4,46	5,07E-04
Médico 2	1,89	2,56	7,09	7,57E-04
Medico 3	1,53	3,50	3,83	0,00
Anestesiista	1,45	0,00	5,60	0,00

quirúrgica. Sin embargo, las lámparas distorsionan el flujo generando una zona de recirculación que atrapa los contaminantes emitidos por los médicos que se encuentran debajo de ellas, lo que eleva las tasas de deposición de partículas sobre la herida. La mesa de instrumental, al estar alejada de la zona de recirculación queda protegida frente a deposiciones de partículas, independientemente de su procedencia (figuras 6 y 7).

Discusión

Las conclusiones principales de este proyecto son:

- Se han desarrollado modelos numéricos que permiten predecir la

dispersión en el aire de una habitación o de un quirófano, así como la deposición de un contaminante biológico. La fiabilidad de los resultados numéricos está avalada por ensayos experimentales de validación.

- Se ha estudiado cómo influye la posición y el tipo de difusor de aire en la dispersión de contaminantes biológicos y por tanto en el riesgo de infección por vía aérea. Las diferencias encontradas para diferentes posiciones de los difusores son notables.
- Se ha estudiado cómo repercute el tipo de sistema de ventilación de un quirófano (laminar o turbulento) en la propagación aérea de

Figura 6. Dispersión del contaminante emitido por el anestesiista lejos de la zona de intervención

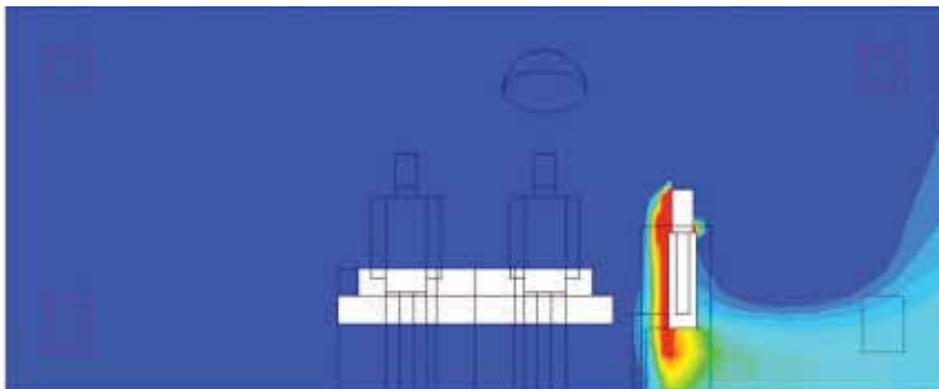
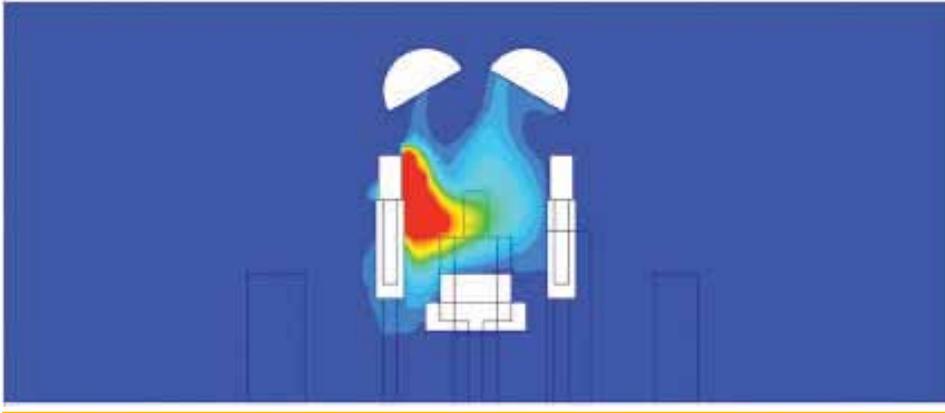




Figura 7. Estancamiento del contaminante emitido por el médico 1 sobre la mesa de operaciones



contaminantes biológicos en el aire del quirófano y la deposición de partículas infecciosas sobre la herida quirúrgica y la mesa de instrumental. Los resultados numéricos ponen en evidencia la distorsión del flujo provocado por las lámparas quirúrgicas en quirófanos de flujo unidireccional y la repercusión que tiene sobre la deposición de partículas sobre la herida quirúrgica.

Agradecimientos

Proyecto financiado por el plan nacional de investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica (Plan Nacional de I+D+i) del Ministerio de Ciencia e Innovación, referencia: DPI2008-06123 y el programa de apoyo a proyectos de investigación de la Junta de Castilla y León, referencia VA015A09.

Bibliografía

1. Kaoutar B, Joly C, L'Hériteau F, Barbut F, Robert J, Denis M, et al. Nosocomial infections and hospital mortality: a multicentre epidemiological study. *J Hosp Infect.* 2004; 58(4):268-75.
2. Li Y, Leung GM, Tang JW, Yang X, Chao CYH, Lin JZ, et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment-a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air.* 2007; 17(1):2-18.
3. Siegel JD, Rhinehart E, Jackson M, Chiarello L and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee. 2007 Guideline for Isolation Precautions: Preventing Transmission of Infectious Agents in Healthcare Settings. *Am J Infect Control.* 2007;35(10 Suppl 2):S65-164.