

# ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE UN MODELO DE DIFUSOR DE AIRE POR DESPLAZAMIENTO ACOPLADO A UN SUELO FRÍO

FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, Alberto <sup>(1)</sup>; PARRAS ANGUITA, Luis <sup>(2)</sup>;

GONZÁLEZ PRIETO, Ignacio <sup>(2)</sup>; DEL PINO PEÑAS, Carlos <sup>(2)</sup>;

CEJUDO LÓPEZ, José Manuel <sup>(1)</sup>

afernandezg@uma.es

<sup>(1)</sup>Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.

<sup>(2)</sup>Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.  
Área de Mecánica de Fluidos.

## RESUMEN

En la última década se han realizado muchos trabajos sobre sistemas de refrigeración para grandes superficies usando ventilación por desplazamiento con suelos radiantes (por ejemplo en aeropuertos y estaciones). De especial interés tiene el conocimiento de los campos de velocidad y de temperatura. De forma simplificada, en este estudio se presentan los resultados de un difusor a escala que utiliza ventilación por desplazamiento con suelo radiante frío. Tres son los parámetros que se modifican: el caudal ( $Q$ ), la diferencia entre la temperatura ambiente y el aire de impulsión ( $\Delta T_1$ ) y la diferencia entre la temperatura del suelo y el aire de impulsión ( $\Delta T_2$ ).

Las visualizaciones y mediciones del campo de velocidad del flujo se han realizado para un régimen laminar en estado estacionario. Además, las simulaciones numéricas del campo de temperatura representado en la figura muestran buena concordancia con los datos experimentales.

Las zonas de mayor interés en este estudio son: la salida del difusor, la zona cercana al suelo y la zona lejos del difusor sobre el suelo, donde las condiciones de contorno se discuten con detalle.

La distancia radial ( $r$ ) para la que cada difusor afecta a su alrededor en los términos de gradiente de temperatura y de velocidad es un parámetro importante para el diseño de la distribución espacial de estos difusores. Los principales resultados de este trabajo se basan en la relación  $r = f(Q, \Delta T_1, \Delta T_2)$ .

**Palabras clave:** Difusión por desplazamiento laminar, simulación numérica, suelo frío.

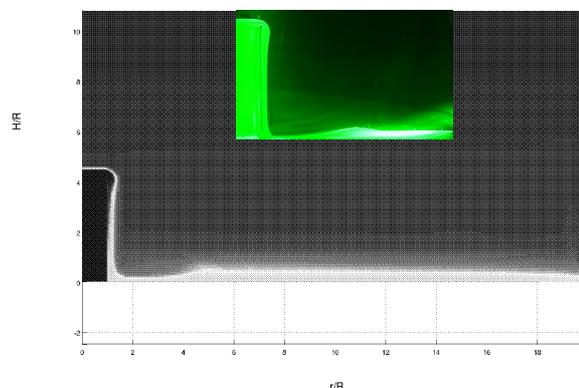


Figura: Descarga radial de aire frío desde el difusor al ambiente.  $Q = 20\text{l/min}$ ,  $\Delta T_1 = 8\text{K}$ ,  $\Delta T_2 = -3\text{K}$ .

## 1. Introducción

La climatización de grandes recintos con sistemas de suelo radiante y con ventilación por desplazamiento [1,2] es un tema de investigación recurrente en las últimas décadas debido a una mayor concienciación social para reducir el consumo energético y por criterios técnicos de confort. Si a esto se le suma que el sistema tiene mayor eficiencia que el usado de forma tradicional, entonces es de interés su aplicación.

Desde el punto de vista ingenieril, lo apropiado es usar el suelo radiante para calefacción, ya que para refrigeración disminuyen ciertos parámetros como son la capacidad térmica y el factor de confort, además de aumentar el riesgo de condensaciones [5]. Por ello es muy interesante conocer la temperatura media radiante influenciada por el sistema del suelo frío que junto con la temperatura del aire impulsado mediante el sistema de ventilación por desplazamiento proporcionarán el confort deseado [3,4]. Para bajas velocidades, menores de 0,2 m/s, la temperatura operativa será la media de las dos temperaturas anteriores, lo que significa que son igual de importantes para alcanzar el nivel de confort térmico del espacio.

El sistema de ventilación por desplazamiento mejora el acondicionamiento térmico mediante suministro de aire a baja velocidad, su principio fundamental es el de variación de la densidad del aire, surgiendo gradientes de temperaturas verticales desde el suelo hasta el techo. Su efectividad aumenta si dentro de la zona ocupada, desde los tobillos hasta la cabeza, nos encontramos con masas de aire caliente y contaminado. Si además el aire impulsado es de baja humedad, disminuye el punto de rocío y aumenta la capacidad de refrigeración del suelo.

En este ámbito es donde reside la motivación del trabajo, cuyo objetivo es fabricar y ensayar un modelo de difusor que combine la ventilación por desplazamiento con un sistema de enfriamiento mediante suelo radiante, en el que realizar medidas cualitativas y cuantitativas del flujo de aire frío impulsado sobre el suelo con intercambio de energía térmica radiante y convectiva [6]. Estas medidas experimentales se compararán con simulaciones numéricas en las mismas condiciones para validarla. Este estudio prepara el camino a posteriores trabajos tendentes a obtener datos cuantitativos del calor transferido por el suelo y del dominio de influencia del difusor.

## 2. Método de trabajo

### 2.1 Diseño y montaje del experimento

Para la realización de los ensayos se diseña un experimento como se muestra en la fig. 1.

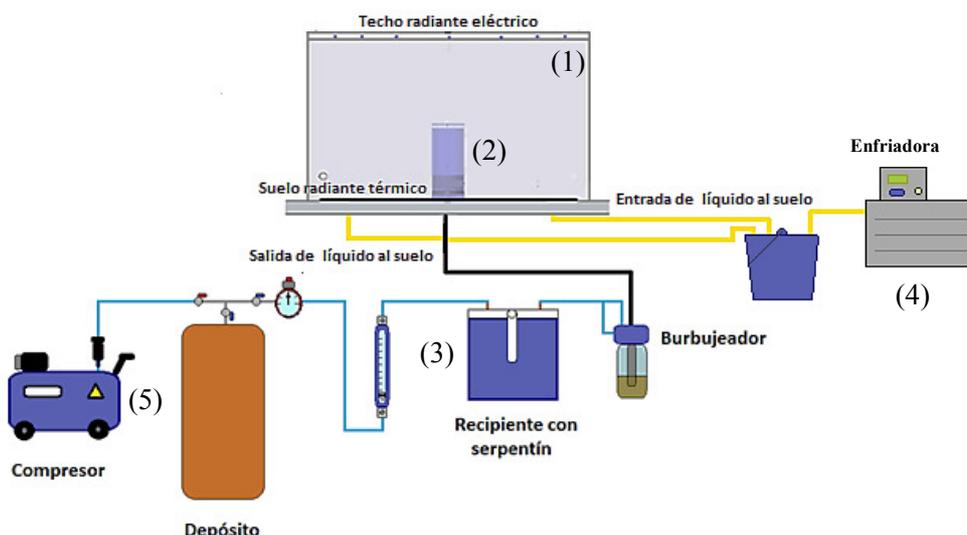


Figura 1: Esquema del montaje experimental.

Los elementos más representativos son los numerados a continuación:

- (1) Urna de metacrilato, que representa el interior del recinto acondicionado, con suelo y techo radiante.
- (2) Difusor de desplazamiento cilíndrico con tapa de metacrilato.
- (3) Recipiente de agua enfriada, burbujeador y caudalímetro.
- (4) Enfriadora de agua.
- (5) Compresor de aire y depósito de almacenamiento.

Uno de los problemas principales de los experimentos con aire es que se ven altamente influenciados por las corrientes de aire debido a diferencias de temperatura o a la propia convección del laboratorio donde se realice. Para evitar estos efectos se usa la urna cerrada de metacrilato que protege al experimento de las corrientes exteriores.

El recorrido que sigue el flujo de aire comienza en el compresor, desde el depósito de acumulación se distribuye el aire mediante una válvula de presión hasta el caudalímetro, donde se regula el caudal deseado y desde aquí se dirige al serpentín donde se enfría a la temperatura deseada. El aire enfriado se introduce en el burbujeador que provoca una emulsión de gotas de aceite para poder visualizar y medir el flujo, este aire con partículas de aceite llega al difusor donde se descarga al recinto. Se elige un difusor cilíndrico parecido a los comerciales y de fácil simulación numérica, la principal diferencia es que el aire asciende desde la parte inferior hasta la tapa donde gira 90 grados para salir al exterior radialmente, una vez fuera del difusor el movimiento del aire es similar, desciende hasta el suelo y se desliza sobre él.

Para uniformizar el flujo que entra en el cilindro se usa una malla de acero, bolas de plástico y un panal de abeja.

El cilindro es de metacrilato de radio exterior  $R = 50\text{mm}$ , su altura  $H_0 = 212\text{mm}$  y la abertura de salida del aire es  $H = 10\text{mm}$ , tal como se representa en la fig. 2.

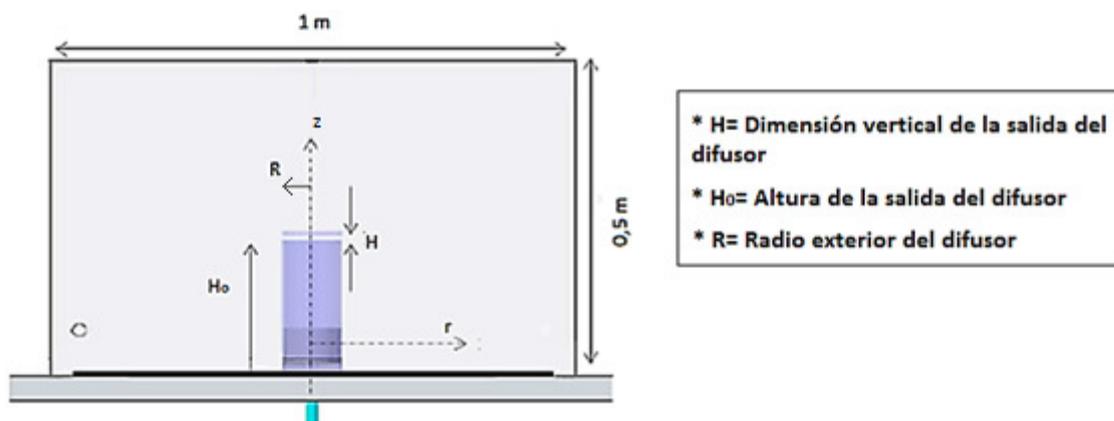


Figura 2: Dimensiones de la urna y parámetros geométricos

Para las visualizaciones se ha usado un láser continuo verde de longitud de onda de 532nm, con una potencia de 500mW. El haz se hace pasar por una lente cilíndrica que permite crear un plano láser, al alinear este plano con el centro del difusor las partículas se iluminan. Esta técnica de visualización se conoce como la dispersión de Mie (Mie Scattering). Esta es la técnica usada en el trabajo y básicamente consiste en la dispersión de las ondas electromagnéticas por partículas esféricas de aceite de oliva.

El suelo del experimento está formado por una lámina de aluminio montada sobre un suelo radiante, esta lámina se pinta de negro para evitar la reflexión y aumentar el contraste a la hora de hacer las visualizaciones y las medidas. En la fig. 3 se muestran las dos formas de deslizamiento del aire sobre el suelo, la imagen (a) presenta un suelo isotermo, a la misma temperatura que el ambiente, o  $\Delta T_2 > 0$ , donde el aire recorre el suelo manteniendo el espesor de la capa de fluido hasta caer perimetralmente en la parte inferior de la urna o bien el aire impulsado se calienta en contacto con el suelo y convecta verticalmente, este último caso no se ha representado por no ser de interés en este trabajo. La imagen (b) presenta un suelo frío a menor temperatura que el aire de impulsión o  $\Delta T_2 < 0$ , donde se produce un resalto térmico, cuya distancia radial y altura son función de  $(Q, \Delta T_2)$ . El techo radiante sirve para estabilizar la temperatura interior de la urna favoreciendo la estratificación.

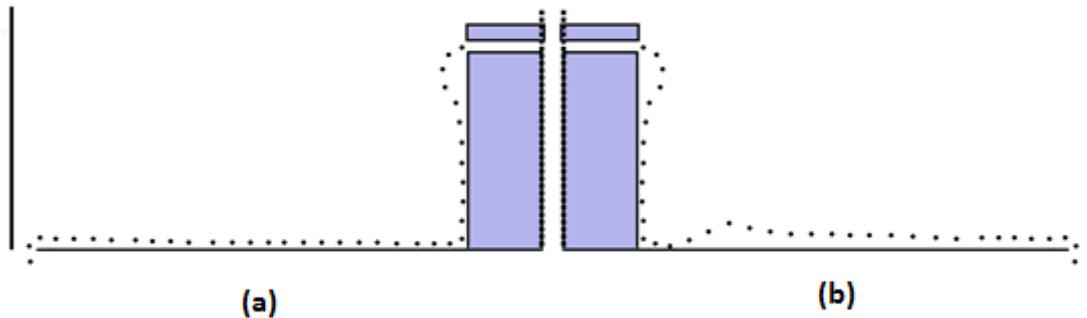


Figura 3: Deslizamiento del aire sobre el suelo: (a) caso isotermo y (b) caso  $\Delta T_2 < 0$

## 2.1.- Medidas experimentales

Se han realizado medidas cualitativas y cuantitativas con las visualizaciones y medidas cuantitativas de velocidad mediante la técnica PIV, Velocimetría de Imágenes de Partículas, que permite determinar el campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido.

Las partículas de aceite servirán de trazadoras y adquieren la misma velocidad del aire debido a sus características y por usar una técnica no intrusiva. Las medidas de las temperaturas se hacen en el interior del difusor, en la urna y fuera de ella, mediante sondas PT-100 y se han hecho simultáneamente para obtener los resultados en las mismas condiciones. Se ha comprobado la reproducibilidad de los experimentos, repitiéndolos en días distintos para los mismos caudales y diferencias de temperatura, obteniendo resultados similares.

Para realizar las visualizaciones, se ha iluminado con el plano láser las partículas de aceite y se ha grabado con una cámara de video a 25 imágenes por segundo. La duración de la grabación de un experimento es de dos a tres minutos, que hace un total de 4000 imágenes. Posteriormente, estas imágenes han sido procesadas en Matlab<sup>®</sup> para obtener la imagen promedio del movimiento. En la fig. 4 se representan dos imágenes promedio, (a) con  $\Delta T_2 = 0$  y (b) con  $\Delta T_2 < 0$ .

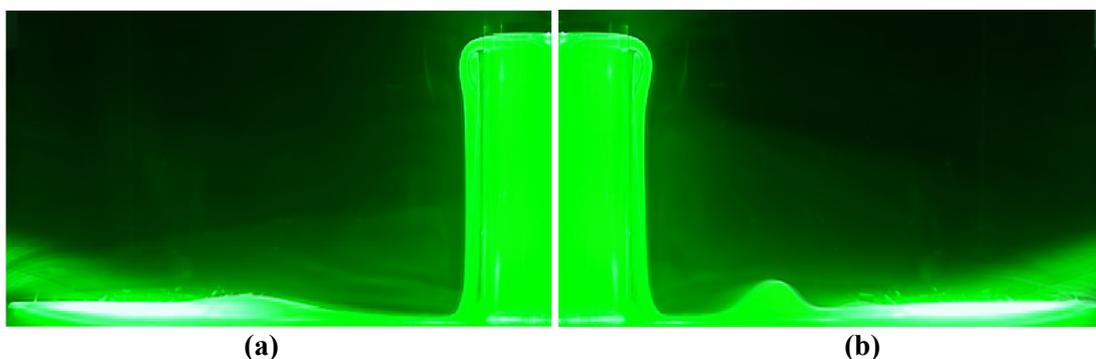


Figura 4: Imágenes promedio con caudal de 10 l/min,  $\Delta T_1 = 2K$ ; Temperatura de impulsión  $T_i=20^\circ C$ , Temperatura ambiente  $T_a=22^\circ C$ . Imagen (a)  $\Delta T_2 = 0$  y (b)  $\Delta T_2 = -5K$

Para analizar la influencia que el caudal y la  $\Delta T_2$  ejerce sobre el resalto térmico, se estudia el punto de velocidad nula de máxima altura del vórtice de circulación que aparece debajo del resalto, en la fig. 5 se representa una imagen promedio para un caudal de 14 l/min donde se aprecian dos vórtices, en la base del cilindro y el del resalto.

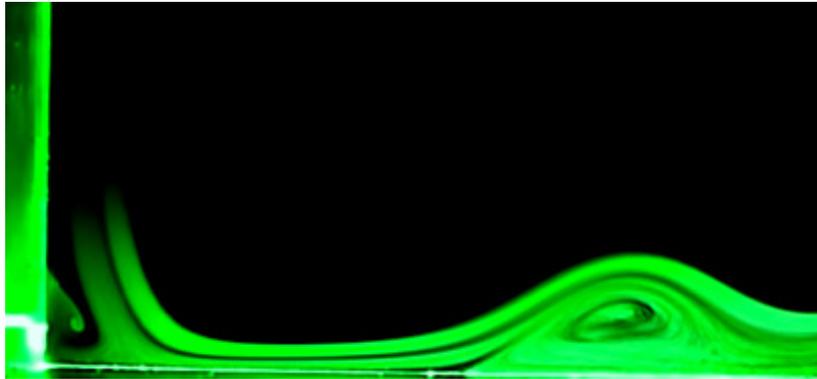


Figura 5: Imagen promedio con caudal de 14 l/min, Temperatura de impulsión  $T_i=28^\circ\text{C}$  y Temperatura ambiente  $T_a=30^\circ\text{C}$ :  $\Delta T_1 = 2\text{K}$ ; Temperatura suelo  $24^\circ\text{C}$ :  $\Delta T_2 = -4\text{K}$

Para identificar el punto con velocidad nula del vórtice del resalto se define la posición axial con  $h_b^*$  y la radial con  $r_b^*$ . En la fig. 6 se representa la distancia adimensional radial del vórtice con velocidad nula en función del caudal para diferentes  $\Delta T_2$ .

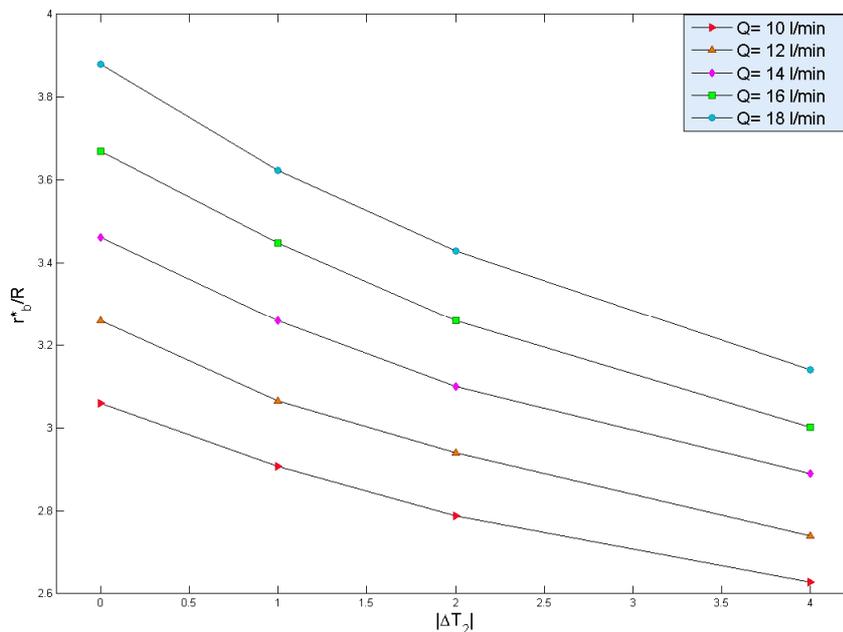


Figura 6. Representación del parámetro  $r_b^*/R$  en función del caudal para diferentes  $\Delta T_2$ .

El resalto térmico es un fenómeno que depende de la energía térmica transferida entre el fluido y el suelo. Para comprobar que no depende de la inercia que puede adquirir el fluido desde la salida del difusor hasta el suelo debido a su altura, se han realizado ensayos a nivel de suelo. En la fig. 7 se muestra una imagen promedio para un caudal de 14 l/min y  $\Delta T_2 = -4K$ .

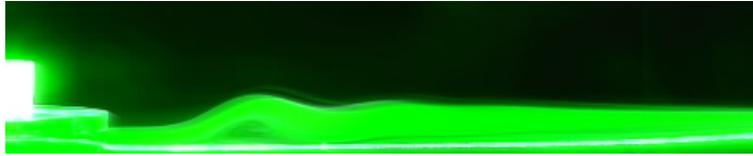


Figura 7: Imagen promedio  $Q = 14$  l/min, Temperatura de impulsión  $T_i=14^\circ C$ , Temperatura ambiente  $T_a=16^\circ C$ ;  $\Delta T_1 = 2K$ ; Temperatura del suelo  $T_s=10^\circ C$ ;  $\Delta T_2 = -4K$

## 2.2.- Simulaciones numéricas

Las simulaciones numéricas se han realizado con el programa comercial Ansys® [7]. Para ello se han resuelto las ecuaciones de Navier-Stokes laminares junto con la ecuación de la energía.

Las propiedades del aire, como la densidad, se ha tomado dependiente de la temperatura, el resto como es la conductividad térmica, el calor específico a presión constante y la viscosidad, se han considerado constantes. Se ha incluido el efecto de la gravedad en el eje x. Las condiciones de contorno son de velocidad constante impuesta en la entrada del flujo, paredes adiabáticas en el difusor cilíndrico y en la tapa, y misma temperatura impuesta techo y paredes de la urna, las condiciones de salida cambian de suelo isoterma a suelo radiante frío.

El modelado de la urna y del difusor se hace mediante axilsimetría, así se evita la necesidad de crear un modelo 3D, esto permite un importante ahorro computacional. En la fig. 8 (a) se presenta el modelado urna-difusor donde se han representado mediante flechas el recorrido del fluido. Para crear el mallado se definen las líneas donde se establecerán las condiciones de contorno del modelo, representados en la fig. 8 (b).

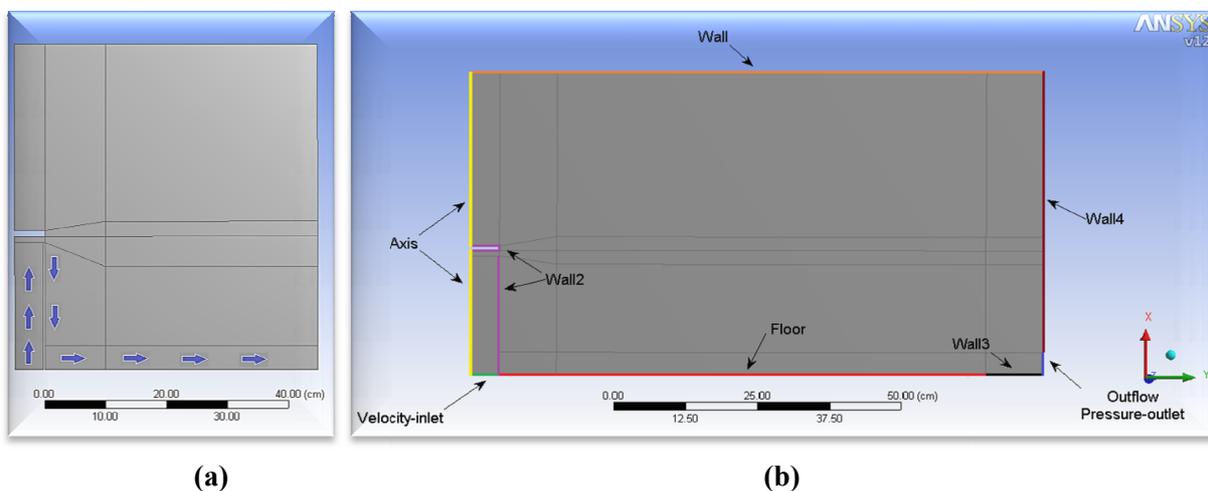


Figura 8: Modelado de la urna y difusor(a) y líneas para establecer las condiciones de contorno (b)

Al ser la geometría del modelo rectangular se han seleccionado elementos cuadrados para realizar el mallado, el número de nodos es de 200.000, con un tamaño de 9MB. El parámetro que indica la ortogonalidad existente entre los nodos de la malla justifica que la calidad del mallado es excelente. La simulación se realiza con doble precisión para un flujo estacionario. El criterio de convergencia seleccionado es restrictivo dado que tanto las variaciones de temperatura como las velocidades son bajas por lo que se establece el número de iteraciones en 1200. Como se trabaja con números de Reynolds entre 170 y 320, se aplica el modelo laminar. En la fig. 9 (a) se representa el campo de velocidad y en la (b) el campo de temperaturas para un caudal de 14 l/min y un  $\Delta T_1 = 3K$ .

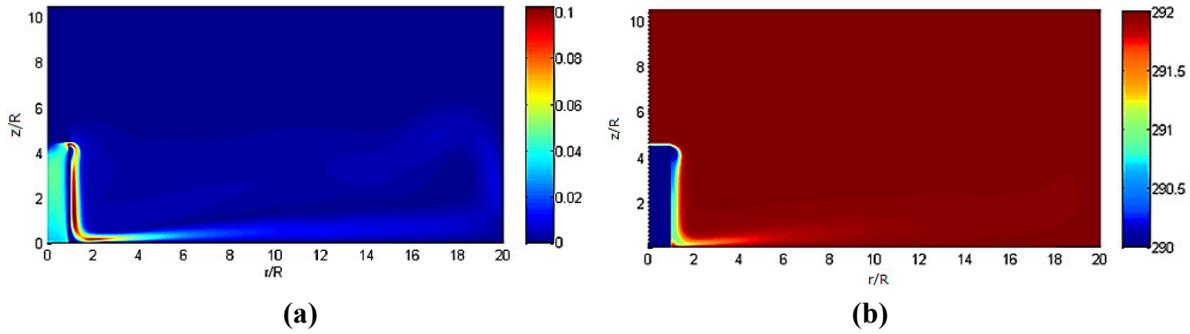


Figura 9: Campo de velocidad (a) y campo de temperatura (b), para un  $Q = 14$  l/min y  $\Delta T_1 = 3K$

Para realizar las simulaciones numéricas con suelo radiante frío, es necesario cambiar la condición de contorno de salida para que la temperatura exterior sea mayor que la de impulsión, de esta forma el aire que recorre el suelo sale del dominio como si estuviera descendiendo hacia la parte inferior de la urna. Esta nueva condición de contorno provoca un efecto convectivo en la salida que podría afectar al resalto térmico pero su influencia es pequeña al producirse lejos de la zona de interés. En la fig. 10 se representa el campo de velocidad para un caudal de 14 l/min,  $\Delta T_1 = 3K$  y  $\Delta T_2 = -2K$ .

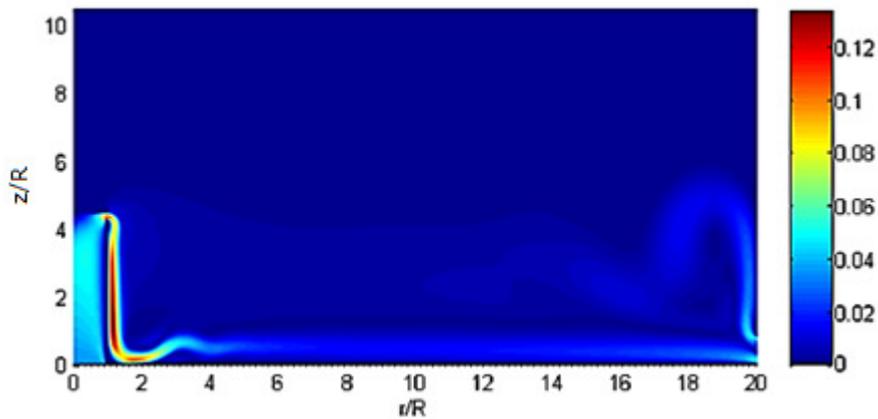


Figura 10: Campo de velocidad para un  $Q = 14$  l/min,  $\Delta T_1 = 3K$  y  $\Delta T_2 = -2K$

### 3. Resultados

Al comparar el perfil de velocidad obtenido en el suelo isotermo de forma experimental con el obtenido mediante simulación numérica, observamos su alto grado de concordancia. En la fig. 11 se representan los perfiles de velocidad obtenidos con la técnica PIV y mediante simulación, para un caudal de 16 l/min a una distancia radial adimensional  $r/R = 3$  y  $\Delta T_1 = 5K$ .

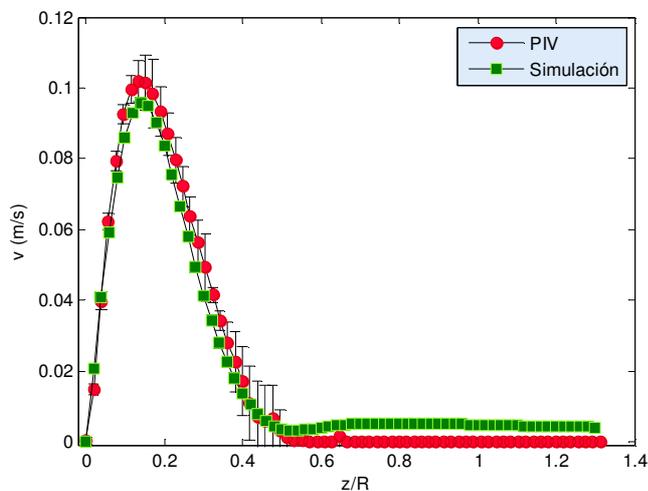


Figura 11: Comparación de los perfiles de velocidad para un  $Q = 16$  l/min y  $\Delta T_1 = 5K$

Al estudiar la variación que experimenta la velocidad a lo largo de la distancia radial, observamos que los datos proporcionados por la simulación numérica están dentro del rango de error cometido en la toma de medidas experimentales. En la fig. 12 se comparan los valores de las velocidades máximas sobre el suelo isoterma para un caudal de 14 l/min y un  $\Delta T_1 = 5K$ . Para conocer la distancia de influencia del difusor solo hay que ponerle un límite inferior a la velocidad máxima.

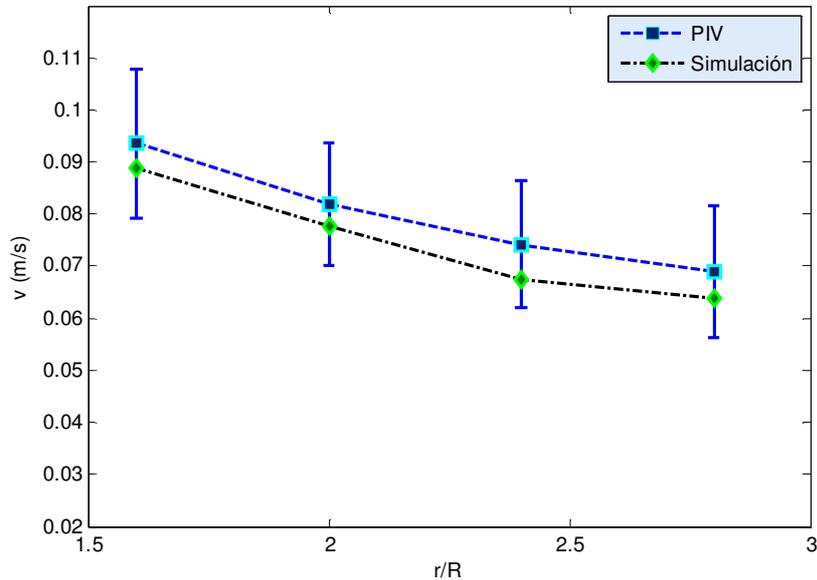


Figura 12: Comparación de las velocidades máximas para un  $Q = 14$  l/min y  $\Delta T_1 = 5K$

Demostrada la bondad del modelo generado para realizar las simulaciones numéricas, se presentan a continuación algunos resultados. En la fig. 13 se comparan dos perfiles de temperaturas con los caudales 12 y 16 l/min para un  $\Delta T_1 = 4K$  y una distancia  $r/R = 3$ .

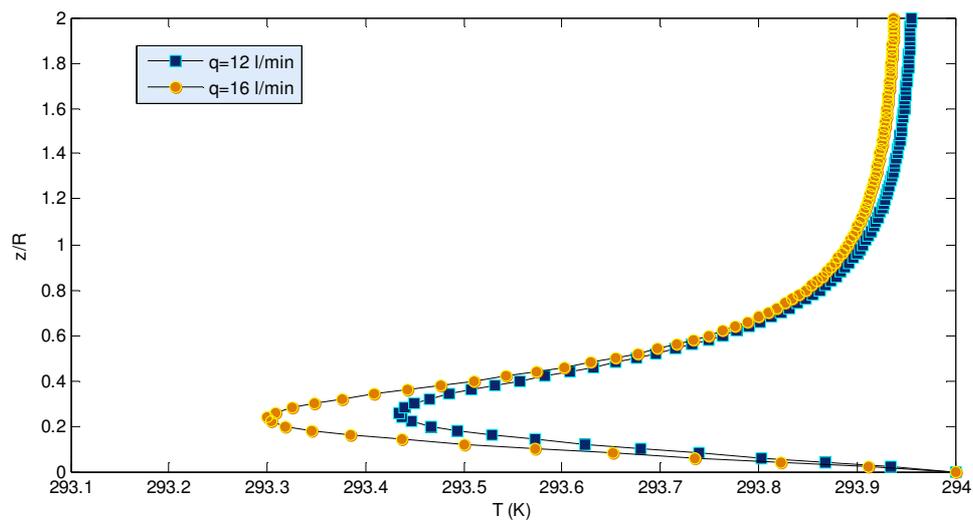


Figura 13: Perfiles de temperatura para los caudales 12 y 16 l/min y  $\Delta T_1 = 4K$  en  $r/R = 3$

Para determinar el radio de acción del difusor, se establece como límite inferior de la velocidad máxima sobre el suelo el valor de 0,05 m/s, de forma que se pueda relacionar el caudal al variar el  $\Delta T_1$ . En la Fig. 14 se representa la distancia radial adimensional máxima para cada  $\Delta T_1$  y un caudal de 10 l/min.

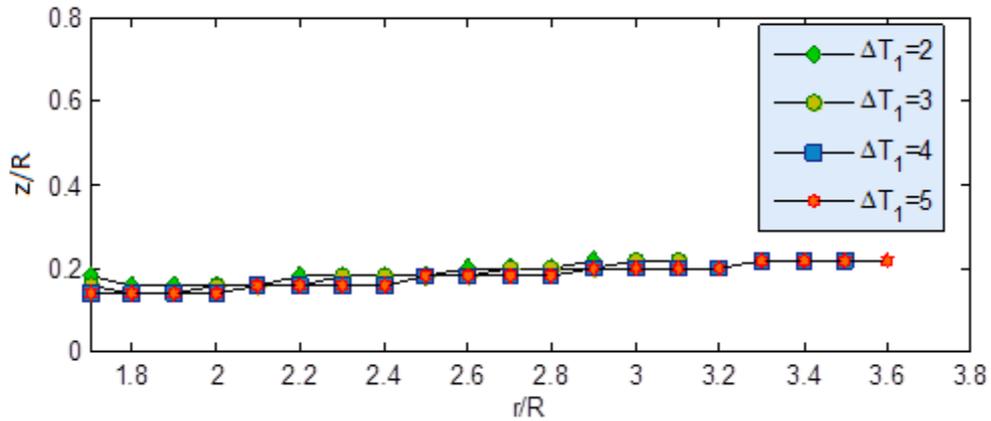


Figura 14: Distancia radial adimensional máxima para un caudal de 10 l/min y diferentes  $\Delta T_1$ .

Con suelo radiante frío el radio de acción del difusor se determina al modificar  $\Delta T_2$ , manteniendo constante  $\Delta T_1$ . En la Fig. 15 se representa la distancia radial adimensional máxima con suelo frío capaz de alcanzar un caudal de 10 l/min con  $\Delta T_1 = 6K$  al modificar la  $\Delta T_2$ .

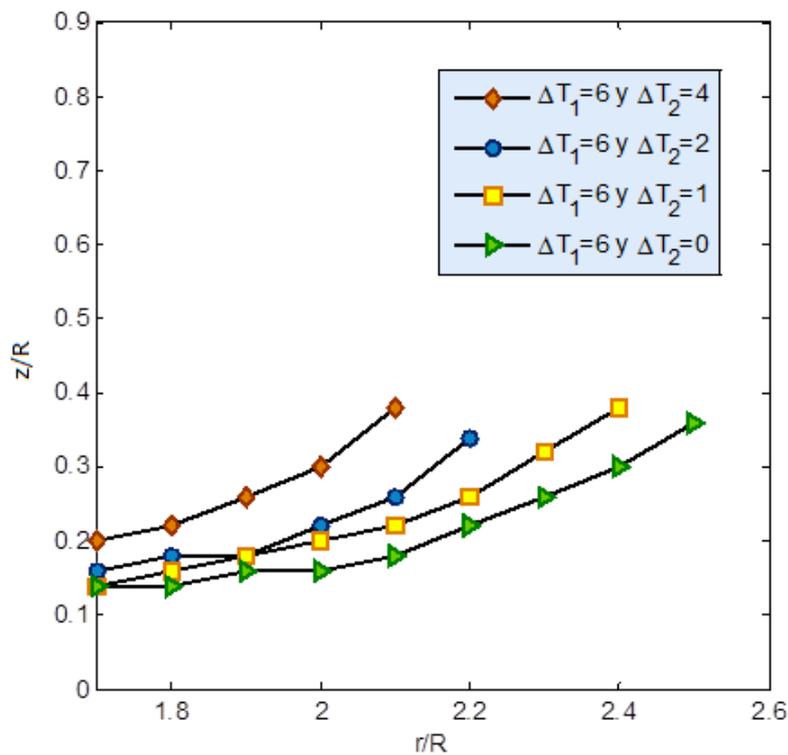


Figura 15: Distancia radial adimensional máxima para un caudal de 10 l/min y diferentes  $\Delta T_2$ .

#### 4. Conclusiones

1. Se ha diseñado y montado un experimento donde el campo fluido presenta un comportamiento estable, estacionario y simétrico.
2. Los resultados experimentales han sido utilizados para validar el modelo numérico que constituye una herramienta útil y fiable capaz de reproducir las condiciones impuestas en el experimento.
3. En zonas cercanas al difusor (salida), al aumentar  $\Delta T_1$  la velocidad máxima del flujo aumenta manteniendo el caudal. Si el caudal aumenta notablemente y  $\Delta T_1$  disminuye sensiblemente, la velocidad máxima del flujo permanece constante, por lo que influye más el cambio de la temperatura que el caudal.
4. Con suelo isoterma, el radio de acción del difusor es mayor si  $\Delta T_1$  aumenta. La pérdida de temperatura al aumentar el caudal manteniendo  $\Delta T_1$  es muy pequeña al aumentar el radio de acción.
5. Con suelo frío, el radio de acción del difusor disminuye al aumentar  $\Delta T_2$ . Si aumenta el caudal se desplaza el resalto térmico y el radio de acción aumenta.

#### 5. Referencias

- [1] Nielsen P. "Velocity distribution in a room ventilated by displacement ventilation and wall-mounted air terminal devices". *Energy and Buildings* (2000) 31:179–87.
- [2] Cehlin, M. Moshfegh, B. Sandberg, M. "Measurements of air temperatures close to a low-velocity diffuser in displacement ventilation using an infrared camera". *Energy and Buildings* 34 (2002) 687–698.
- [3] Nielsen, PV. The prescribed velocity method - A practical procedure for introduction of an air terminal device in CFD Calculation. Denmark: Aalborg Universitet (1998). ISSN1395-7953 R9827.
- [4] Cehlin, M. Moshfegh, B. "Numerical modeling of a complex diffuser in a room with displacement ventilation". *Building and Environment* 45 (2010) 2240-2252.
- [5] Olesen, B.W. "Possibilities and limitations of radiant floor cooling". *Ashrae. Trans.* V.103, Pt. 1, 1997.
- [6] Fernández Gutiérrez, A. Parras Anguita, L. Gutiérrez Castillo, P. Del Pino Peñas, C. Cejudo López, J.M. "Ensayos experimentales de difusores de aire para acoplamiento a suelos fríos". En *Actas VII CNIT Bilbao (15, 16 y 17 de junio de 2011)*.
- [7] Ansys Manual. Ansys, Inc; 2009.