

15. Validación de simulación dinámica de sistema HVAC de aula docente mediante comparación con recinto real

Campano, Miguel Ángel^(1,*), Pinto, Armando⁽²⁾, Acosta, Ignacio⁽¹⁾, Sendra, Juan J.⁽¹⁾

(1)(*) Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla (Sevilla). mcampano@us.es. 0034 954 55 95 17.

(2) Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal).

Resumen Los centros docentes requieren confort térmico en su interior, pero existe cierta incertidumbre en cómo lo proporcionan los sistemas de climatización asociados, especialmente por las altas cargas internas y la ventilación mecánica. Por ello, se realizan modelos predictivos mediante dinámica de fluidos computacional (CFD); sin embargo, la fiabilidad de las herramientas de simulación ha de ser verificada, por lo que el objetivo principal de este trabajo es definir y desarrollar el proceso de validación de una herramienta de simulación térmica dinámica por comparación con un recinto real.

Se ha definido un protocolo de validación para herramientas de simulación dinámica en espacios de tamaño medio con altas cargas internas mediante comparación con medidas de temperatura realizadas en un aula polivalente existente, cumpliendo con lo establecido en la norma ISO 7726. El aula seleccionada para dicha comparación pertenece al instituto “Eça de Queiros” de Lisboa (Portugal), utilizándose 80 sensores termopar para caracterizar el comportamiento térmico de su ambiente interior. Se obtiene una diferencia media absoluta de 0.21 °C y una desviación estándar máxima de 0.47 °C entre medición y simulación, inferior al límite de ± 0.5 °C de dicha normativa. La aplicación de esta metodología para validar el software Design Builder prueba la fiabilidad de la herramienta en este tipo de recintos.

Palabras clave CFD, Validación software, Diseño HVAC, Eficiencia energética, Aulas.

1 Introducción

A la hora de seleccionar el sistema de climatización para resolver el acondicionamiento higrotérmico y de calidad del aire de los edificios, aparece la incertidumbre sobre cuál será el comportamiento real del sistema de difusión/emisión de energía en los recintos tratados, así como la eficiencia energética del mismo frente a otros sistemas alternativos de similares prestaciones.

Aunque hay métodos predictivos para determinar el balance energético en locales genéricos a fin de dimensionar sus sistemas de climatización (HVAC), ya sea mediante mediciones o simulación nodal, existe también un cierto desconocimiento sobre si es correcto el uso de la energía del edificio, así como de la eficiencia de la difusión de aire en recintos habitables considerados como espacios tridimensionales, con ocupantes, mobiliario, equipos y otras fuentes de calor que intervienen activamente en el balance energético.

Para poder predecir el comportamiento de la difusión de aire, es necesario recurrir a la simulación informática mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), previa validación de la herramienta informática por comparación con mediciones en edificios ya existentes.

Se plantea por tanto el aplicar este proceso de validación por comparación sobre un aula polivalente de centro docente, tanto por ser uno de los modelos de recintos con alta ocupación más comunes, como por las mayores necesidades de confort ambiental de sus ocupantes.

1.1 Estado de la cuestión

Al realizar el proceso de simulación energética dinámica de recintos arquitectónicos, es posible solventarlo de forma completamente autónoma mediante técnicas CFD. Sin embargo, puede llegar a ser extremadamente largo y complejo, ya que habría que caracterizar de forma dinámica el balance térmico con el exterior y el resto de recintos del edificio a través de la envolvente y de los flujos de aire intercambiados. Por ello, este proceso se realiza habitualmente mediante acoplamiento (Negrão 1995), separándose en dos fases consecutivas, ya sean simulaciones de estado estacionario o dinámico (Zhai et al. 2002, 2004):

- Cálculo nodal, donde se establece un balance térmico global del que se generan las condiciones de contorno.
- Cálculo mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). A partir de las condiciones previas de contorno obtenidas del cálculo nodal, se realiza una caracterización detallada y exhaustiva del movimiento y variación térmica de las masas de aire en el interior de un recinto, así como de su interacción dinámica con el resto de elementos existentes en dicho local.

Este tipo de procesos de simulación energética carecen de fiabilidad mientras no hayan sido validados por comparación. En este sentido, y como antecedentes que han servido de base para el presente estudio, cabe destacar especialmente el trabajo desarrollado por Karimipannah et al. (2007); este se centra en el análisis de la eficiencia de la distribución térmica tanto de sistemas de desplazamiento como de chorros confluentes a través de simulaciones CFD, siendo previamente calibradas con un conjunto de mediciones in situ realizadas en un modelo de aula real, construido en el interior de una cámara térmica. Asimismo, también son relevantes los trabajos de Yang et al. (2014) en el estudio en aulas alemanas, tanto de ventilación natural cruzada como de sistemas ventilación mecánica y sistemas de desplazamiento, además del trabajo de Conceição y Lúcio (2011) en aulas portuguesas tratadas con sistemas de superficie radiante y refrigerante.

1.2 Objetivos

El objetivo de este estudio es la validación de la herramienta Design Builder como software de simulación CFD, aplicado para la caracterización del comportamiento térmico de recintos de tamaño medio con altas cargas internas y densidad de ocupación elevada.

Para ello, se desarrolla un protocolo de validación en el que realiza la monitorización de la temperatura interior de un aula docente existente, utilizándose como elemento de comparación de los modelos predictivos de simulación a generar con dicho software.

2 Metodología

Para establecer la metodología de trabajo de este estudio sobre validación de software, es preciso definir la muestra de estudio a usar como punto de comparación, eligiendo los parámetros objetivos que se usarán de referencia. Tras seleccionar la herramienta de simulación, se define el método de análisis comparativo con su marco normativo.

2.1 Selección de la muestra de estudio

El modelo de trabajo elegido para este estudio de validación es el interior del aula 24 del centro docente “Escola Secundária Eça de Queirós”, siendo ejemplo representativo de aula polivalente de educación secundaria de la Península Ibérica. Este se ubica en la freguesia de Olivais, dentro del término municipal de Lisboa (Por-

tugal), ciudad considerada como zona Csa según el índice climático de Köppen (2006), y propiedad del ente público “Parque Escolar” del Gobierno de Portugal. Este centro fue realizado por el arquitecto Jorge Martins.

El local se encuentra ubicado en la segunda planta del centro docente, en la esquina sur del mismo. Se encuentra en contacto con el exterior por sus paredes sureste y suroeste, así como por su cubierta. Su pared noroeste la separa del aula 23, y la noreste del pasillo de circulación y del aula 25. Por último, está situada sobre la sala de trabajo de profesores de la planta primera.

Las dimensiones de dicho aula son 7 metros de largo, 7 metros de ancho y 3 metros de alto, contando en su interior con 31 pupitres y la mesa del profesor (Fig. 1). Su único acceso se encuentra en la pared en contacto con el pasillo, disponiendo de un aireador en su parte superior, con una superficie de admisión de 0.15 x 0.80 m.

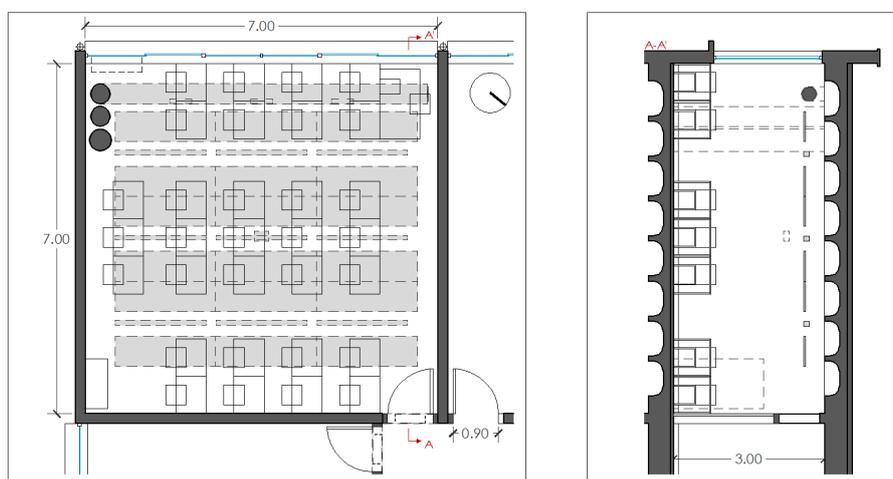


Fig. 1 Planta y sección del aula polivalente 24 del centro docente “Eça de Queirós”

La clase está equipada con un PC de sobremesa situado en la mesa del docente, que cuenta con un proyector asociado en el centro del techo del recinto. El aula dispone de un sistema de iluminación colgado de 9 luminarias fluorescentes de 48 W cada una, organizadas en tres filas paralelas a la pared de la ventana, quedando enrasadas con el falso techo.

La composición constructiva de la envolvente del aula se muestra en la tabla 1. Como sistema de HVAC, el centro docente cuenta con una producción térmica de tipo hidrónico, red a cuatro tubos y una Unidad de Tratamiento de Aire de tipo Todo-Aire Exterior por cada 4 aulas, localizadas en la cubierta, desde las que se abastece a todas las salas de cada agrupación de aulas a través de un sistema de conductos de impulsión individuales de chapa de diámetro 300 mm, los cuáles se localizan en cada aula encima de la ventana corrida. En este conducto se disponen

tres rejillas de impulsión a 45° respecto de la horizontal, realizándose la extracción a través de un aireador sobre la puerta. Así, la eficiencia de la ventilación en modo refrigeración es de 1.0, mientras que en calefacción es de 0.8 (CR 1752:1998). Las infiltraciones medidas en este recinto son de 0.51 ACH, pero estas se consideran nulas mientras el sistema DE HVAC esté operativo, dada la sobrepresión generada.

Tabla 1 Tabla resumen de datos constructivos del centro docente “Eça de Queirós” (Lisboa)

Elemento	Composición	U (W/(m ² · K))
Cerramientos	Mortero de cemento monocapa 1 cm; bloque hueco cerámico 14 cm; cámara de aire sin ventilar 1 cm; lana mineral (0.031 W/mK) 2 cm; 2x placa de yeso laminado 1 cm	0.69
Particiones	2x placa de yeso laminado 1 cm; cámara de aire sin ventilar 1 cm; Bloque hueco cerámico 14 cm; cámara de aire sin ventilar 1 cm; 2x placa de yeso laminado 1 cm	0.96
Forjados	Linóleo 1 cm; mortero de cemento 2 cm; capa de arena 4 cm; forjado reticular hormigón 35 cm	2.4
Cubierta	Capa de grava 5 cm; XPS extrusionado (0.034 W/mK) 5 cm; capa de mortero de cemento 1 cm; Lámina de betún 0.2 cm; capa de mortero de cemento 1 cm; hormigón con árido ligero 10 cm; forjado reticular hormigón 35 cm	0.55
Huecos	Vidrio de 6 mm (vidrio simple) Carpintería de aluminio (2 cm) sin rotura de puente térmico Protección por estore interior opaco de color gris claro	5.8 5.9

Las condiciones climáticas del emplazamiento durante las mediciones in situ aparecen en la tabla 2, tomadas en la estación meteorológica del aeropuerto de Portela, a un kilómetro y medio al oeste del centro docente.

Tabla 2 Tabla resumen de datos climáticos (estación meteorológica del aeropuerto de Portela)

Localización: Lisboa (Portugal) Latitud/Longitud: 38.76° / -9.11° Zona horaria: GTM +0:00	Elevación: 114.0 m Exposición al viento: Normal Velocidad media del viento: 5.0 m/s
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------

Plantilla de datos climáticos: Portela_2012.swec
Temperatura suelo en invierno: 8.8 °C

TA/HR verano (0.4%): 34.1 °C / 29.5 %
TA/HR invierno (99.6%): 4.1 °C / 85 %

2.2 Medida de parámetros objetivos

Para realizar este proceso de validación CFD, el aula seleccionada fue monitorizada durante 5 días del mes de noviembre, durante los cuales se estudiaron de forma tanto continua como esporádica las condiciones térmicas del interior del aula, con el objetivo de obtener tanto las condiciones de partida (condiciones de contorno) para las simulaciones como los valores de contraste para la validación. Toda esta información se obtuvo mediante el empleo de los siguientes equipos, dispuestos según se muestra en las figuras 2 y 3:

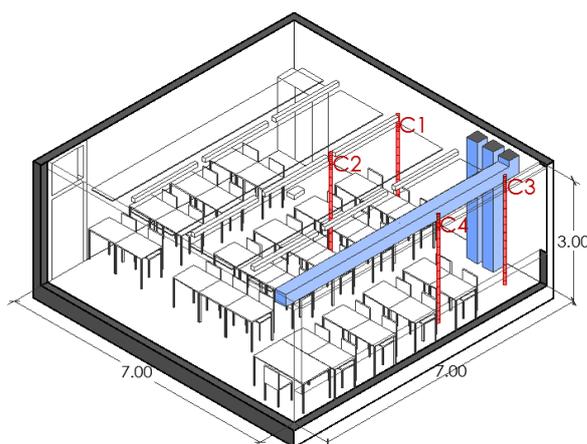


Fig. 2 Volumetría del aula 24 con la ubicación de las cuatro columnas de sensores termopar

- Medición continua en el tiempo (contraste para validación CFD):
 - 80 sensores termopar tipo J, distribuidos en 4 columnas con 20 sensores cada una (C1, C2, C3 y C4).
 - 3 sensores de hilo caliente TA5 Thermal Anemometer, asociados a las columnas C1 y C2.
 - 2 sensores de molinete Vane Sensor Anemometer AIRFLOW AV6 (35 mm para la impulsión del sistema HVAC y 100 mm para el exterior).
 - Data Loggers DT85 DataTaker y DT800 DataTaker.
- Medición ocasional en el tiempo (condiciones de contorno):
 - Sensor conjunto Testo 810 para la temperatura radiante de los paramentos.
 - Sensor conjunto Testo 0635.1535 para la temperatura del aire y la velocidad del aire en el aireador de la puerta.

Los sensores termopar tipo J tienen un error de desviación de ± 1.1 °C, así como un error medio de 0.069 °C y uno máximo de 0.207 °C respecto del sensor de referencia Testo 0635.1535 utilizado, de tipo RTD PT-100 (Campano et al. 2015).

El instante de medición seleccionado en este intervalo de tiempo es a las 9:25 del día 21/11/2012, por estar el aula a pleno rendimiento. Los datos de ocupación, iluminación, equipos informáticos, las condiciones interiores y los parámetros de funcionamiento del sistema de HVAC asociados a dicho instante de la medición quedan recogidos en la tabla 3.



Fig. 3 Interior del aula 24 con la ubicación de las cuatro columnas de sensores termopar

2.3 Herramienta de simulación

El software elegido para el cálculo de la distribución de energía en el interior es Design Builder 2.42.026, el cual trabaja mediante acoplamiento al incorporar un módulo CFD de bajo costo computacional de tipo “estado estacionario” (steady-state), permitiendo hacer capturas temporales del modelo analizado a partir de un conjunto de condiciones de contorno obtenidas de su módulo nodal de *Energy Plus*. Para este estudio, dado que se centra en validar el módulo CFD, estas se obtienen directamente a partir de las mediciones realizadas en el aula existente (tabla 3), correspondiéndose principalmente a la temperatura y velocidad media del aire en el interior del recinto, la temperatura radiante de sus superficies, la emisión térmica de los elementos existentes y los caudales de admisión/extracción de aire.

Esta herramienta fue previamente validada tanto por la School of Built and Natural Environment de la Universidad de Northumbria (2011) como por Campano et al. (2015).

Se seleccionó un modelo de turbulencia de dos ecuaciones (Standard $k - \epsilon$), dado que es el más completo que incluye esta herramienta, a pesar de considerar la realidad como un flujo plenamente turbulento. Un modelo RNG podría resolver flujos laminares con mayor precisión, pero la desviación relativa entre los resultados de ambos modelos de turbulencia es aceptable para este tipo de ambientes interiores (Stamou and Katsiris 2006, Srebric et al. 2008). Asimismo, se ha tomado el modelo “Upwind” de discretización de segundo orden, ya que bajo condiciones no extremas, es más sencillo para el cálculo de casos con aire como único fluido de trabajo sin por ello tener un error significativo en los resultados esperados.

Tabla 3 Condiciones interiores medidas, cargas internas y funcionamiento del sistema HVAC en el instante de medición

Cargas internas			
Ocupación	22 estudiantes (16 años) y 1 profesor (tasa metabólica 1.20 met, 130 W)		
Iluminación	3 filas suspendidas de 3 luminarias fluorescentes de 48 W (40 % convectivo)		
Equipos	Proyector EPSON EB85 275 W (45 % convectivo) PC desktop: 140 W (70 % convectivo) PC laptop: 140 W (70 % convectivo)		
Condiciones interiores medidas			
Temperatura media del aire (°C)	19.6 °C	Temperatura media radiante (°C)	19.2 °C
Temperatura del aire exterior (°C)	16.2 °C	TR Pared interior frontal (°C)	20.1 °C
TR Pared interior lateral (°C)	19.4 °C	TR Pared exterior lateral (°C)	19.0 °C
TR Pared exterior trasera (°C)	19.1 °C	TR suelo (°C)	19.3 °C
TR techo (°C)	19.6 °C	TR ventana °C	17.8 °C
HVAC			
Sistema	Sistema hidrónico a cuatro tubos. Producción térmica mediante caldera y enfriadora. Tratamiento térmico mediante UTAE-TA multizona (22000 m ³ /h, 125 kW en frío) con recuperación de calor (60 kW). Distribución por conductos individuales hasta los recintos.		
Impulsión	1100 m ³ /h (3 x 366.67 m ³ /h) a 16.2 °C (7.48 ACH). Tres rejillas de doble deflexión de 0.1 x 0.05 m dispuestas en conducto de chapa sobre la ventana con un ángulo de 45°.		
Extracción	Aireador sobre puerta, dimensiones de 0.15 x 0.80 m		

Los ocupantes sentados se han modelado en esta herramienta mediante cuatro prismas, correspondientes a la cabeza, el torso (incluyendo los brazos) y las piernas flexionadas. Su superficie total es de 1.85 m², lo cual corresponde con la superficie media de piel que posee un ser humano (ISO 7730:2005). Su emisión térmica es de 1.2 met, actividad de trabajo ligero sentado, equivalente a 130 W (ISO 8996:2004, ISO 7730:2005). La fracción convectiva para dicha actividad es del 30% (Novoselac, 2006).

La discretización del dominio de partida se ha realizado mediante la superposición de un mallado tridimensional de tipo hexaédrico estructurado ortogonal con densidad variable. Esta malla tiene un espaciado máximo de 0.05 m, reduciéndose progresivamente en la proximidad de superficies y objetos hasta 0.0125 m. La tolerancia de unión utilizada es de 0.0065 m y se establece una relación máxima entre las aristas de las celdas resultantes de 1/10 y un error residual mínimo de 10^{-5} .

Teniendo en cuenta que un mayor número de celdas por uso de mallados más finos requiere una mayor capacidad computacional, es necesario equilibrar los modelos realizando una malla que se adapte a las condiciones del modelo sin una pérdida de precisión en los resultados con:

- Una mayor densidad de celdas en aquellas regiones en las que el fluido estudiado cambie bruscamente sus variables (variación significativa del número de Reynolds).
- Una menor densidad de celdas en aquellas regiones en las que el fluido estudiado mantenga sus valores físicos de forma más o menos homogénea.

Para garantizar la independencia de este mallado, se desarrollan dos hipótesis de discretización paralelas sobre el modelo informático a simular, las cuales han de contar con diferentes densidades de mallado, y de las que se han de obtener los mismos resultados de cálculo.

- Modelo de ensayo A: malla de 8,028,426 celdas.
- Modelo de ensayo B: malla de 5,451,444 celdas.

2.4 Metodología de análisis

Para la validación de la herramienta se procede a comparar los resultados de temperatura del aire de ambas simulaciones con las mediciones de temperatura del aire obtenidas por los 80 sensores termopar agrupados en las columnas C1 a C4 (Fig. 2), usándose para ello tanto el valor medio de estas medidas como su desviación estándar (intervalo de confianza de 95%).

Para la comparación de dichos valores de temperatura del aire se utiliza la norma ISO 7726:2002 sobre Instrumentos de medición para el cálculo de la Ergonomía del Ambiente Térmico, donde se indica que, para obtener una calificación mínima de C en la medición del confort térmico, no se puede superar una desviación estándar máxima de ± 0.5 °C.

3 Resultados

Los valores de temperatura del aire obtenidos, tanto de la simulación dinámica de los modelos A (8,028,426 celdas) y B (5,451,444 celdas) como de las mediciones in situ, se muestran en la figura 5 y en la tabla 4.

Tabla 4 Valores de temperatura del aire en los puntos de referencia (Pos) de las mediciones (m) y las simulaciones de los modelos (A y B)

Pos (m)	Columna A (°C)			Columna B (°C)			Columna C (°C)			Columna D (°C)		
	m	A	B	m	A	B	m	A	B	m	A	B
2.70	20.18	19.56	19.56	20.47	20.70	20.26	19.83	20.09	19.72	19.69	19.98	19.79
2.65	19.85	19.62	19.57	19.84	20.70	20.26	19.66	20.02	19.71	19.63	19.98	19.78
2.60	19.78	19.64	19.53	19.66	19.96	19.75	19.55	19.89	19.71	19.57	19.98	19.77
2.55	19.76	19.56	19.51	19.55	19.63	19.55	19.52	19.81	19.73	19.54	19.78	19.73
2.50	19.75	19.46	19.54	19.52	19.49	19.48	19.54	19.83	19.72	19.57	19.77	19.71
2.45	19.72	19.40	19.57	19.59	19.42	19.46	19.60	19.88	19.71	19.73	19.77	19.69
2.40	19.69	19.38	19.61	19.55	19.41	19.45	19.65	19.87	19.73	19.88	19.77	19.67
2.35	19.66	19.36	19.64	19.54	19.38	19.45	19.69	19.83	19.75	19.89	19.78	19.65
2.30	19.63	19.36	19.66	19.50	19.37	19.44	19.73	19.82	19.78	19.58	19.78	19.64
2.10	19.56	19.34	19.60	19.50	19.31	19.42	19.84	19.70	19.74	19.64	19.77	19.67
1.90	19.51	19.33	19.45	19.49	19.27	19.39	19.77	19.56	19.71	19.68	19.74	19.71
1.70	19.50	19.32	19.38	19.27	19.23	19.36	19.59	19.44	19.65	19.84	19.68	19.71
1.50	19.47	19.30	19.37	19.26	19.19	19.34	19.48	19.36	19.56	19.83	19.59	19.64
1.30	19.45	19.31	19.37	19.19	19.16	19.31	19.52	19.35	19.51	19.79	19.49	19.52
1.10	19.32	19.24	19.31	19.16	19.09	19.19	19.39	19.37	19.50	19.61	19.41	19.42
0.90	19.23	19.21	19.28	19.12	18.83	18.91	19.42	19.37	19.50	19.55	19.39	19.31
0.70	19.08	19.21	19.27	19.00	18.73	18.86	19.34	19.36	19.50	19.49	19.41	19.27
0.50	19.00	19.20	19.27	19.01	18.87	19.00	19.64	19.33	19.51	19.43	19.32	19.26
0.30	18.98	19.19	19.27	19.11	18.92	18.94	19.66	19.31	19.51	19.29	19.26	19.21
0.10	18.94	19.17	19.22	19.07	18.80	18.81	19.55	19.35	19.43	19.09	19.29	19.23
2-σ	-	0.40	0.44	-	0.48	0.30	-	0.58	0.22	-	0.40	0.34
Temperatura media medida (°C)							m: 19.53		A: 19.50		B: 19.51	
Desviación estándar medida (95%, °C)							-		A: 0.47		B: 0.33	

El modelo de ensayo B (mallado menos denso) muestra unos valores de temperatura del aire levemente más próximos a los medidos en el aula (tabla 4), con una diferencia media absoluta de 0.14 °C y una desviación estándar de 0.33 °C. Cuando se comparan con los del modelo de ensayo A (mallado más denso), la diferencia entre los valores medios de ambas simulaciones no es significativa, al ser menor de 0.07 °C, pero sí es mayor entre sus desviaciones estándar, 0.14 °C, aunque

ambos ensayos cumplen con la norma ISO 7726; así, ambas densidades de malla-
do son apropiadas para discretizar este tipo de modelos.

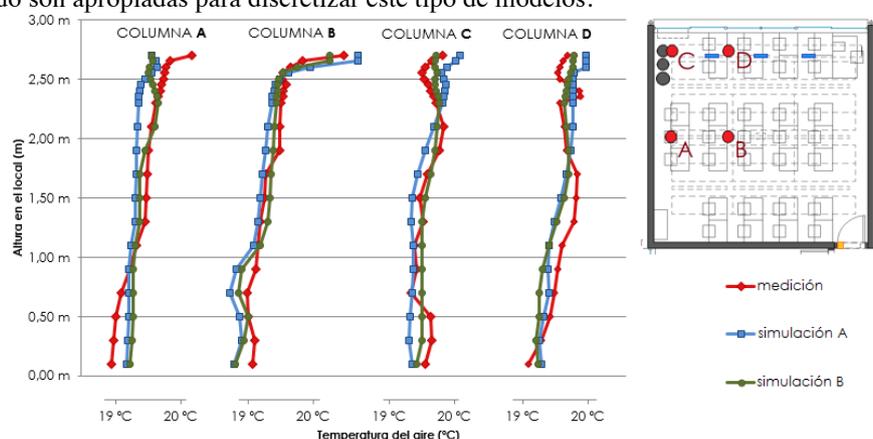


Fig. 5 Curvas de variación vertical de temperatura del aire para la medición y los modelos de simulación A y B

4 Conclusiones

En este estudio se ha propuesto un protocolo de validación para herramientas de simulación dinámica en espacios de tamaño medio con altas cargas internas, mediante comparación de valores de temperatura del aire según la ISO 7726:2002. Como ejemplo de aplicación, se ha validado el software Design Builder, comparando sus resultados con un recinto existente, un aula docente del centro “Eça de Queirós” de Lisboa (Portugal). Para ello, se han tomado una serie de valores de temperatura del aire y radiante en una matriz de puntos de su interior, medidos con 80 sensores termopares, obteniéndose una diferencia media absoluta de 0.21 °C y una desviación estándar máxima de 0.47 °C entre medición y simulación, inferior al límite máximo de ± 0.5 °C de dicha normativa. El desarrollo y aplicación de esta metodología de validación por comparación ha permitido probar la fiabilidad de dicha herramienta para la predicción del comportamiento térmico de este tipo de recintos, así como la viabilidad de las hipótesis de discretizado del espacio realizadas.

Referencias

Campano MA, Acosta I, Fernández-Agüera J, Sendra JJ (2015). Towards finding the optimal location of a ventilation inlet in a roof monitor skylight, using visual and thermal performance

- criteria, for dwellings in a Mediterranean climate. *Journal of Building Performance Simulation*, 8 (4), 226-238. doi: 10.1080/19401493.2014.913683
- Campano MA (2015) Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: Aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía, PhD Dissertation, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Conceição EZE, Lúcio MMJR (2011) Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling systems and subjected to uniform convective environment. *Appl Math Model* 35, 1292-1305. doi: 10.1016/j.apm.2010.09.006
- European Committee for Standardisation (1998) Ventilation for buildings. Design criteria for the indoor environments, CR 1752:1998. European Committee for Standardisation, Bruxelles.
- International Organization for Standardization (2002) Ergonomics of the Thermal Environment. Instruments for Measuring Physical Quantities, ISO 7726:2002. International Organization for Standardization, Geneva.
- International Organization for Standardization (2004) Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate, ISO 8996:2004. International Organization for Standardization, Geneva.
- International Organization for Standardization (2005) Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, ISO 7730:2005. International Organization for Standardization, Geneva.
- Karimipannah T, Awbi HB, Sandberg M, Blomqvist C (2007) Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor-level air supply systems in classrooms. *Build Environ* 42 (2), 647-655. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.10.016
- Negrao COR (1995) Conflation of computational fluid dynamics and building thermal simulation, PhD Dissertation, University of Strathclyde, Glasgow.
- Novoselac A, Burley BJ, Srebric J (2006). Development of new and validation of existing convection correlations for rooms with displacement ventilation systems. *Energ Buildings* 38, 163-173. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.04.005
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006) World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated, *Meteorol Z* 15, 259-263.
- School of Built and Natural Environment of Northumbria University. (2011). An Inter-Program Analysis of Computational Dynamics Based on PHOENICS and Design Builder. Available: http://www.designbuilder.co.uk/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,39/Itemid,30/. Accessed 10 Mar 2016.
- Srebric J, Vukovic V, Guoqing H, Yang X (2008) CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and airflow simulations around human occupants in indoor environments. *Build Environ* 43 (3), 294-303. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.03.023
- Stamou A, Katsiris I (2006) Verification of a CFD model for indoor airflow and heat transfer. *Build Environ* 41 (9), 1171-1181. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.06.029
- Yang W, Fu-Jun Z, Kuckelkorn J, Di L, Jun L, Jun-Liang Z. (2014). Classroom energy efficiency and air environment with displacement natural ventilation in a passive public school building. *Energ Buildings* 70, 258-270. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.071
- Zhai ZJ, Chen Q, Haves P, Klems JH (2002) On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. *Build Environ* 37, 857-864. doi: 10.1016/S0360-1323(02)00054-9
- Zhai ZJ, Chen QY (2004) Sensitivity analysis and application guides for integrated building energy and CFD simulation. *Energ Buildings* 38 (9), 1060-1068. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.12.003

Agradecimientos Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el IV Plan Propio de Investigación de la Universidad de Sevilla. Su desarrollo fue posible gracias a la colaboración tanto del “Laboratório Nacional de Engenharia Civil”, como del Ente Público “Parque Escolar” de Portugal.