

05-008

POINT CLOUDS 5D MANAGEMENT FOR THE ENERGY ANALYSIS OF BUILDINGS

Pérez Andreu, Víctor; Castilla Pascual, Francisco Javier; Adan Oliver, Antonio; Quintana Galera, Blanca; Prieto Ayllón, Samuel Antonio

UCLM

Simulation is a common procedure for the characterization and energy analysis of buildings. Although the simulation tools are continually improving, the energy modelling process is still a specialized work, which entails a cost in terms of staffing and time. The use of new systems and tools can provide automatic and more accurate real models, which represents a significant advance in the simulation methods.

This paper presents a methodology that uses together dense laser scanner and infrared data in order to calibrate energy models obtained from a simulation software. The data acquisition system automatically provides a set of thermal point clouds of a scene at different times, which are later processed and turned into a 3D geometrics and thermal models. The geometric model at each time is then encoded in a gbXML format and finally exported to an energy simulation software. With regard to the thermal model, it is used to calibrate the energy model which was generated in the simulation tool. As a result, this methodology highly reduces the data collection, modelling and analysis times, and substantially improves the accuracy of the simulated models.

Keywords: *Energy Simulation; Energy Model; Building; CFD; Thermography; 3D thermal point cloud*

GESTIÓN DE NUBES DE PUNTOS 5D PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE EDIFICIOS

La simulación es un procedimiento común para la caracterización y análisis de comportamiento energético y medioambiental de edificios. Aunque la tecnología disponible está en continua evolución, actualmente el proceso de modelización energética es un trabajo especializado, que supone un alto coste en personal y en tiempo. Por lo tanto, el uso de nuevos sistemas y herramientas que proporcionen modelos reales automáticos y precisos supone un avance significativo en los métodos de simulación.

En este artículo, se presenta el uso avanzado de tecnologías laser escáner y termografía infrarroja para calibrado de modelos de simulación energética. El sistema permite, de forma programada, la obtención automática de series de nubes térmicas, en el tiempo y en el espacio de una escena escaneada. Los datos obtenidos permiten posteriormente la creación automática de modelos geométricos y térmicos reales, siendo el modelo 3D geométrico codificado en formato gbXML y exportado a un software de simulación energética. Por su parte, el modelo térmico 3D obtenido permite la calibración precisa de los modelos energéticos generados en un software de simulación. Como consecuencia de todo lo anterior, la metodología empleada reduce los tiempos de toma de datos, modelización y análisis, mejorando sustancialmente la precisión de los resultados.

Palabras clave: *Simulación energética; Modelo energético; Edificio; CFD; Termografía; Nube de puntos térmica 3D*

Correspondencia: Víctor Pérez Andreu victor.perez@uclm.es



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La generación de modelos de forma más o menos automatizada para el análisis del comportamiento energético de edificios es un asunto tratado desde hace tiempo en numerosos trabajos de investigación (Giannakis et al, 2015; Santos et al, 2017). El número de variables que intervienen en el comportamiento energético de los edificios es tremendamente amplio, lo que dificulta enormemente la obtención de resultados parejos a la realidad y por ende el uso de dichos modelos para hacer análisis predictivos fiables. Por ello es necesario realizar monitorizaciones y registrar datos in situ que permitan contrastar los resultados obtenidos y calibrar los modelos de simulación utilizados.

Esto resulta aún más complejo si se trata de aproximar los valores de parámetros ambientales de los espacios interiores, como temperatura, humedad, nivel de iluminación o calidad del aire, que pueden sufrir variaciones considerables en las distintas zonas de un mismo recinto.

Cuando se trata de estudiar el comportamiento de edificios existentes, la creación automatizada de modelos de simulación podría hacer el proceso mucho más expedito y facilitar el uso de los mismos. La eficacia a la hora de recabar información para la generación de los modelos geométricos arquitectónicos, para su posterior análisis, aumenta si se puede solapar con la obtención de datos de parámetros ambientales que permitan cuantificar y calibrar los resultados obtenidos en posteriores simulaciones.

1.1 Objetivos

El objetivo de este artículo es exponer el método desarrollado para gestionar la información disponible a partir de nubes de puntos procedentes de escaneado laser conjunto con termografía infrarroja para responder a las necesidades expuestas anteriormente. La información nos permite generar modelos geométricos de espacios a partir de nubes de puntos y contrastar simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics) con datos obtenidos a través de termografías, estableciendo un procedimiento para poder comparar los resultados de manera cuantitativa. El trabajo forma parte de un proyecto de investigación más amplio, en el que se pretende obtener otros datos a partir de uso de termografías secuenciales (como transmitancias térmicas de elementos) de forma automática o visualizar resultados de evolución de temperatura en envolventes edificatorias de forma dinámica.

En segunda instancia, a partir de estos podemos obtener mapas de temperatura radiante de los paramentos y a partir con ellos la temperatura operativa, con mayor precisión y en distintos momentos, a efectos de determinar el confort en los puestos de trabajo de una oficina o aula.

1.2 Revisión de la literatura

La termografía infrarroja está demostrando ser una técnica cada vez más utilizada en la medición de condiciones ambientales e investigación de cerramientos o envolventes arquitectónicas (Kirimtat, 2018). A las ya habituales aplicaciones de inspección para determinar, de forma cualitativa, la existencia de humedades (Rocha, 2018), filtraciones de aire o puentes térmicos en edificios (O'Grady, 2018; Sfarra, 2019) se incorporan cada vez con más frecuencia otras que permiten cuantificar parámetros característicos, como transmitancias térmicas (U) de elementos constructivos (Tejedor et al, 2018; Bienvenido-Huertas et al, 2019)) o temperaturas superficiales de paramentos (Ham, 2015; López-Fernández, 2017). Los primeros concluyen que este puede resultar un método fiable para

determinar el valor de U en clima mediterráneo, con saltos térmicos inferiores a 10°C (ya que esto suele ser una limitación habitual en los ensayos de este tipo en nuestro clima) obteniendo desviaciones (respecto a otros métodos de medición) inferiores al 0,2% para cerramientos multicapa con elementos masivos. Los segundos desarrollan métodos de medición y mapeado de las temperaturas superficiales de modos automáticos para obtener nubes de puntos y generar modelos tridimensionales.

Un análisis más exhaustivo del estado de la cuestión con una revisión crítica sobre la termografía infrarroja se puede encontrar en Nardi (2018) concluyendo que la técnica madura progresivamente a medida que se dispone de más casos de estudio y que es necesaria más investigación para determinar la fiabilidad de los resultados en paramentos y elementos constructivos de distinta índole, no solo cerramientos opacos multicapa.

El uso de mediciones y obtención de imágenes termográficas sucesivas en el tiempo también ha sido utilizado en diferentes investigaciones para localizar defectos constructivos en edificios (Fox et al, 2015), demostrando las ventajas de esta técnica frente al uso de imágenes instantáneas, cuyos resultados a menudo son limitados y enormemente influenciados por las condiciones ambientales y radiaciones reflejadas transitorias.

La integración de esta información en modelos BIM (Building Information Modeling) también ha sido tratada en otros trabajos (Ham, 2015; Natephra, 2017), en los que se apunta las posibilidades de uso de esta información para análisis de comportamiento térmico y evaluación del confort ambiental, usando herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics) combinadas con el modelo térmico. Análisis similares se han realizado en otras disciplinas utilizando las imágenes termográficas para contrastar resultados con simulaciones CFD (Freund, 2019; Mirzaei, 2015) en el estudio y caracterización de placas para un intercambiador o paneles fotovoltaicos para fachadas.

Algunos trabajos anteriores ya planteaban el uso de la termografía y el modelado de transferencia de calor como técnicas complementarias para evaluar el rendimiento térmico de las fachadas de edificios durante y después de la construcción (Taylor et al, 2014). El modelado proporciona una base objetiva para calcular la distribución de temperatura esperada sobre un paramento para la comparación con los resultados de la imagen termográfica. Es necesario que exista coherencia entre los supuestos de modelización y las condiciones medioambientales que influyen en la termografía de la construcción para que esta comparación sea fiable. En este caso se utiliza el programa de modelado Therm para simular exclusivamente un muro. Otros trabajos más recientes han aplicado esta misma metodología para comparar los resultados de imágenes termográficas, en este caso instantáneas y realizadas por el exterior, con resultados de simulaciones CFD en espacios interiores (Morón, 2018) usando en este caso el programa de simulación STAR-CCM+ y demostrando diferencias inferiores a 1°C entre ambos métodos.

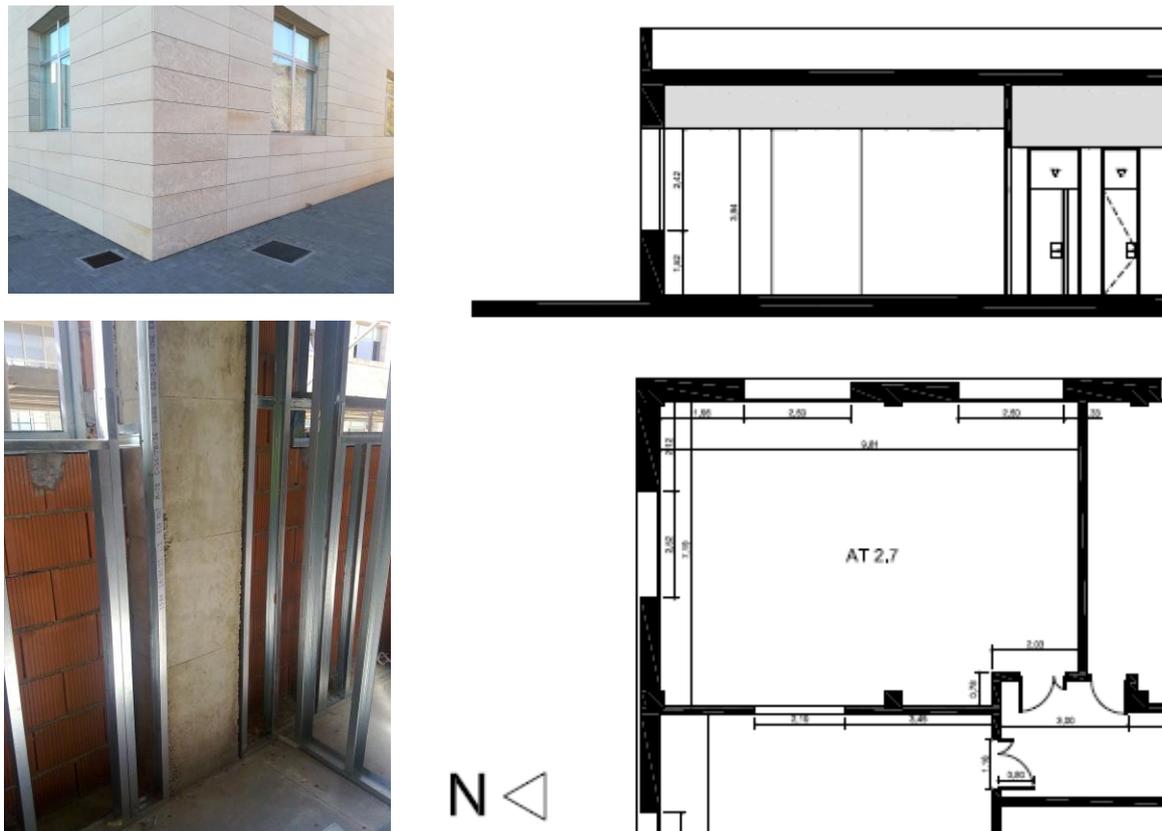
2. Metodología

Para cumplir el objetivo marcado se presenta la metodología desarrollada mediante un caso de estudio. El método desarrollado comprende los siguientes pasos: 1) Escaneado del espacio y medición de parámetros ambientales. 2) Generación de modelo para simulación térmica a partir de datos geométricos escaneados y de parámetros constructivos y condiciones de funcionamiento conocidas. 3) Obtención de mapas de temperaturas superficiales a partir de simulación CFD (estacionaria). 4) Obtención de mapas de temperaturas de las superficies in situ medidos mediante termografía. 5) Comparación cuantitativa y análisis de resultados obtenidos por ambas vías.

2.1 Descripción del caso de estudio

El espacio objeto de estudio para la experimentación es una sala de uso esporádico (de 7m x 10m en planta), situada en el Instituto de Tecnología de la Construcción y las Telecomunicaciones, ubicado en el campus universitario de Cuenca, en el borde exterior de la ciudad (40°04' 50"N; 2°08'52"W), en un entorno expuesto, con un clima seco mediterráneo. La sala dispone de sistema de climatización mediante fancoils de techo que no se han activado durante el experimento y de un sistema de renovación de aire (mediante rejilla de impulsión y extracción, procedente de un intercambiador de calor) cuya programación se conoce. La composición y características de los elementos constructivos que conforman la envolvente también es conocida. La disposición de una doble hoja con aislamiento interior y exterior minimiza enormemente el efecto de los puentes térmicos de pilares y forjados de hormigón. Se va a analizar solo el comportamiento de una pared cuya normal está orientada al norte, y el experimento se realiza a finales del mes de marzo, por lo que el soleamiento que recibe es prácticamente nulo. La pared dispone de un hueco central sin protecciones solares y con la simple obstrucción provocada por el retranqueo del mismo respecto a los paramentos interior y exterior. La toma de datos se realiza durante un periodo de 24h.

Figura 1: Imágenes: exterior del edificio, detalle construcción cerramiento, planta y sección del espacio de ensayo



2.2 Obtención del modelo geométrico y mediciones realizadas

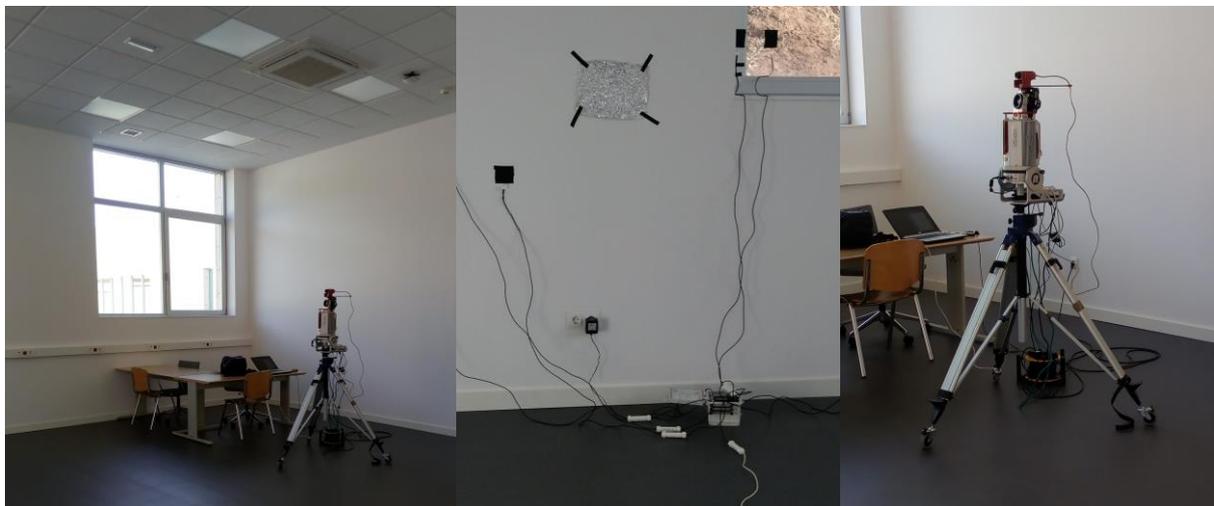
Para la toma de datos se ha utilizado un escáner 3D modelo Riegl VZ-400. El escáner obtiene nubes de puntos en un rango de 500m. Una toma cubre un área de 360°x100° y

para unas resoluciones angulares de 0.065° (tanto vertical como horizontal) se obtienen 5 millones de coordenadas en 47 segundos. La precisión de medida de distancia es de 5mm y la repetitividad de 3mm. Al escáner se acopla una cámara térmica modelo FLIR A65, que cuenta con una resolución de 640x512 pixels, un campo de visión (FOV) de $45^\circ \times 37^\circ$ y con una frecuencia de 30Hz. El rango de temperatura en modo de alta ganancia es de [233K-823K] con una precisión de 0.4K. Se realiza una primera toma de escaneado del espacio en 360° con solapamiento de imágenes de un 20%, lo que permite obtener la nube de puntos necesaria para el modelado. Posteriormente se realiza el escaneado térmico cada 30 min y durante 24h (48 tomas) sobre el paramento interior de la fachada norte, realizando 13 fotos cada toma. Para la obtención de los valores de temperatura se realiza una corrección de las lecturas en base a una ecuación obtenida tras procedimiento de calibración de la cámara con cuerpo negro.

Para registrar parámetros ambientales se utiliza una estación HOBO U30 NRC. Se han colocado sensores para medir la temperatura superficial en el paramento objeto de estudio, para contrastar el resultado de los valores obtenidos en la termografía y determinar la influencia de la emisividad de los materiales en las mediciones, con el fin de utilizar la información térmica en trabajos posteriores para la obtención de transmitancias. Se colocan cuatro sensores, sobre el enlucido de yeso, la carpintería de aluminio, el vidrio y otro de ambiente interior separado del paramento. Se coloca adicionalmente una lámina de aluminio reflectante con objeto de determinar la influencia de las radiaciones reflejadas en dichos estudios,

Las condiciones exteriores se recogen en una estación meteorológica DAVIS VANTAGE situada en la cubierta del edificio, que permite obtener Radiación solar, Velocidad del viento, precipitación, Humedad Relativa y Temperatura.

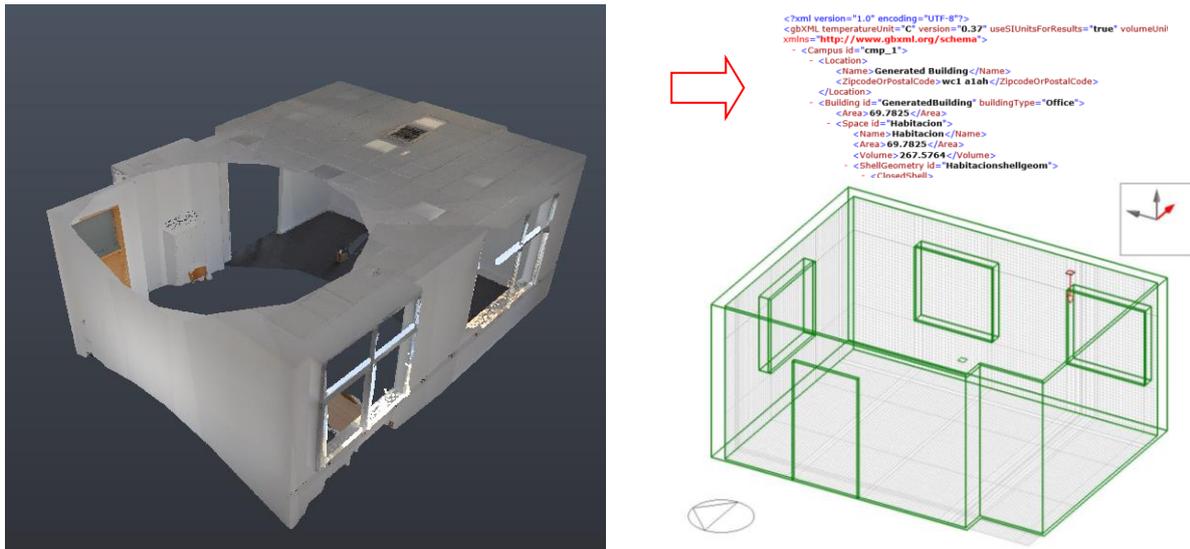
Figura 2: imágenes con posicionamiento de los sensores y escáner



2.3 Modelización y parámetros de simulación CFD

La herramienta utilizada para realizar la simulación es el programa *DesignBuilder* (versión 5.0.3.0.014), que utiliza como motor de cálculo *Energy Plus*. A partir de los datos de la nube de puntos con coordenadas geométricas se obtiene un archivo .xml que es importado en el programa, generando la geometría del espacio (figura 3).

Figura 3: .xml a partir de segmentación de nube de puntos y modelo Designbuilder



La composición de los cerramientos, aberturas y condiciones de renovación de aire se recogen en la tabla 1. A partir del archivo climático .epw correspondiente al clima tipo de Cuenca, obtenido de la base de datos del propio Energy Plus (accedido, 2019) y usando los software *weather converter* y *elements*, se han sustituido los datos de la semana correspondiente al periodo (24h) de ensayo y se ha generado el nuevo archivo utilizado para la simulación. La simulación CFD se puede realizar para cada uno de los momentos en que se han tomado imágenes termográficas durante el ensayo, aunque en este estado de la investigación tan sólo se ha realizado en dos de ellos para validar el método expuesto. Los modelos CFD estacionarios informan de temperatura, velocidad del aire distribuidos de forma espacial a partir de una malla. Gracias a la simulación CFD podemos obtener mapas de temperaturas en los puntos de dicha malla 3D que se ha definido como dominio de cálculo. Esta es una información mucho más rica que una temperatura única y genérica para todo el espacio, y para cada superficie de los elementos constructivos (paramento de yeso, aluminio, vidrio) que en el mejor de los casos puede ofrecer la simulación de EnergyPlus por sí misma.

Tabla 1: características de los elementos del modelo

	Descripción	Transmitancia (W/m2-K)	Superf (m2)
_CERRAMIENTO EXT	Doble hoja Bloque cerámico (ext) Panel yeso laminado (int), 8cm aislamiento lana mineral, aplacado,	0.221	72.62
_PARTICIONES	Panel Yeso laminado, aislamiento interior	1.977	71.60
_SUELO	Solera de hormigón, aislamiento 10cm PEX	0.294	77.38
_CUBIERTA PLANA	Grava , 10cm aislamiento PEX, forjado hormigón, cámara aire 50cm, techo modular	0.277	77.38
_ABERTURAS	Acristalamiento 4/6/4, carpintería de aluminio RPT	3.313	18.10

Resultados

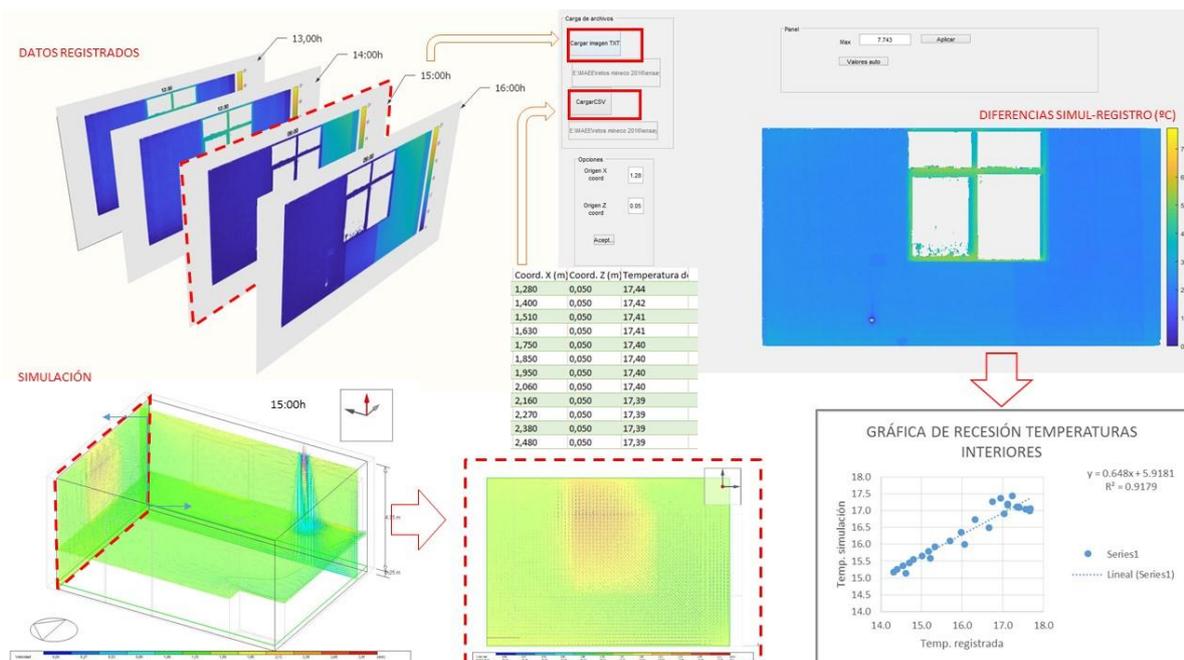
3.1 Obtención de Imagen térmica del modelo y exportación de datos de temperatura en los puntos de la rejilla:

Inicialmente se ha realizado una simulación del espacio, usando el método de funciones de transferencia de calor (HTF) para las 24h de ensayo. Las temperaturas de superficie obtenidas por el cálculo de la simulación para cada hora, pueden convertirse automáticamente en parámetros de contorno, para una simulación CFD estacionaria, importando los resultados .idf al módulo CFD. Se ha realizado el cálculo según modelo de turbulencia 2-K-e que permite obtener automáticamente mediante una función los coeficientes de transferencia superficial de calor de los paramentos. El mecanismo principal para visualizar los resultados del análisis CFD es la generación de planos, que permite seleccionar uno o más planos alineados con los ejes geométricos X,Y,Z del modelo. En este caso se estudian planos paralelos al paramento objeto de ensayo situados lo más próximo posible a la superficie de este (5cm). De todas las variables posibles que se pueden mostrar se ha seleccionado la temperatura de bulbo seco. El programa permite generar los datos en celdas y exportarlos en un archivo csv, que luego se utilizará para comparar con los datos registrados.

3.2 Obtención de datos a partir de las nubes térmicas y comparación de resultados

Para poder comparar los resultados de la simulación con las mediciones realizadas con la cámara térmica, se han de extraer de la nube de puntos térmica correspondiente al instante en el que se realiza la simulación CFD, los datos segmentados de la misma forma que la malla usada en el análisis CFD. La segmentación la proporciona una aplicación desarrollada en *matlab* que permite: leer las coordenadas proporcionadas por el archivo de exportación .csv de *designbuilder*, extraer los datos de temperatura de los pixeles correspondientes a la tesela equivalente de la malla CFD, comparar las diferencia entre las temperaturas y visualizarlas gráficamente en la misma aplicación o exportarlas en archivo .csv para su posterior análisis estadístico. El proceso completo se recoge en la figura 4.

Figura 4: Flujo de trabajo para comparación de resultados de simulación y datos registrados



3.3 Análisis de resultados:

En esta fase del trabajo se han comparado los resultados de dos momentos extremos del día (7:00h y 16:00h) pudiéndose apreciar diferencias máximas de 2°C en las zonas opacas del paramento, y más acusadas en las zonas de la carpintería de aluminio. El procedimiento no permite analizar las temperaturas en la zona de la ventana al no disponer de lectura termográfica en el vidrio. Como se puede apreciar en las imágenes (figura 5) esta información resulta difícil de obtener de una simple visualización de las mismas, obtenidas del software de simulación y de la herramienta de visualización de las termografías. Es necesario desarrollar el procedimiento de comparación de forma cuantitativa de los datos, que permiten ser visualizados a través de la aplicación específica (figura 6) y generar los archivos .csv con ambos registros para su posterior análisis.

Figura 5: Imagen térmica obtenida de nube de puntos (zda) y simulación (dcha) (7:00h)

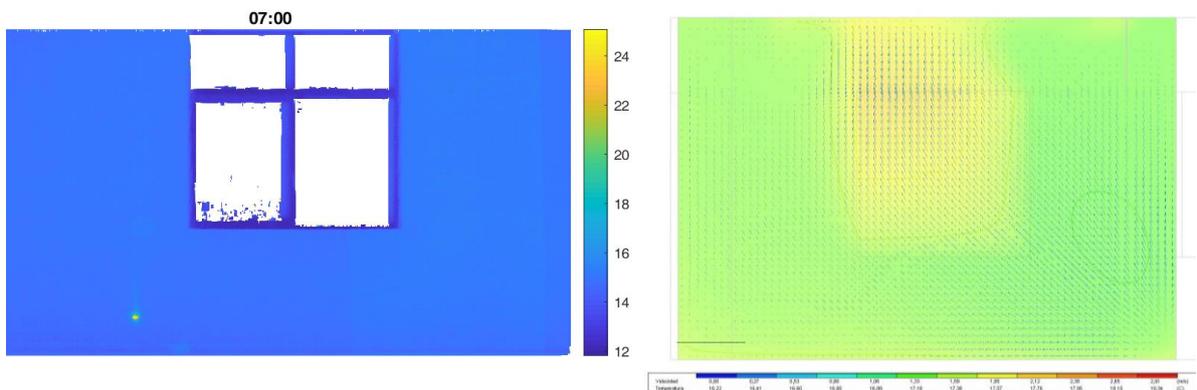
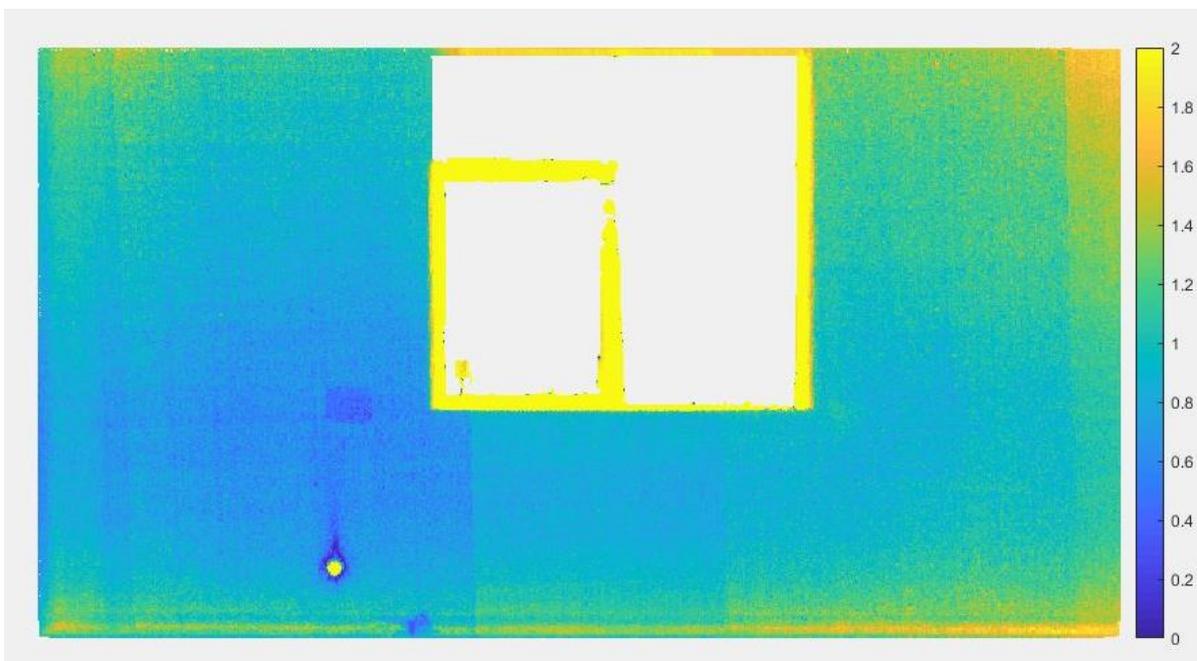


Figura 6: Imagen mostrando las diferencias en °C entre las imágenes anteriores (7:00h)



En esta primera comparación se puede observar como las diferencias son inferiores a 1°C en la zona central del paramento y es necesario estudiar por separado las zonas correspondientes al hueco (marco de la ventana) para poder obtener resultados fiables.

4. Conclusiones

El escaneado termográfico del paramento interior del edificio ha permitido extraer datos para generar un modelo numérico comparable con los resultados obtenidos utilizando una herramienta de modelado CFD. El modelo CFD permite complementar las temperaturas que se encuentran en elementos como el vidrio, no detectables en la termografía, de cara a utilizar esta información en la determinación de condiciones de confort (temperatura operativa) en estudios posteriores.

La diferencia global entre las medidas con cámara termográfica y las obtenidas mediante simulación para los mismos puntos en el paramento varía entre 0.4 °C y 0.8 °C., por lo que los niveles de error son inferiores a la precisión de los elementos de medición utilizados para las pruebas in situ. Se pretende realizar en trabajos posteriores análisis de recesión de los resultados comparando las imágenes en cada toma, para determinar con mayor fiabilidad la influencia de las condiciones ambientales en las superficies con distintos materiales.

5. Referencias

- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J. J. & Marín, D. (2019) Influence of ICHTC correlations on the thermal characterization of façades using the quantitative internal infrared thermography method, *Building and Environment*, Volume 149, 2019, Pages 512-525, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.056>.
- EnergyPlus (2019) https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/ESP%20%20
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. & De Wilde, P. (2015) Time-lapse thermography for building defect detection, *Energy and Buildings*, Volume 92, 2015, Pages 95-106, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.021>.
- Freund, S. & Kabelac, S. (2019) Investigation of local heat transfer coefficients in plate heat exchangers with temperature oscillation IR thermography and CFD, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 53, Issues 19–20, 2010, Pages 3764-3781, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.027>.
- Giannakis, G.I., Lilis, G.N., Garcia, M.A., Kontes, G.D., Valmaseda C. & Rovas D.V. (2015). A METHODOLOGY TO AUTOMATICALLY GENERATE GEOMETRY INPUTS FOR ENERGY PERFORMANCE SIMULATION FROM IFC BIM MODELS. Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015
- Ham, Y. & Golparvar-Fard, M. (2015) Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling, *Automation in Construction*, Volume 49, Part B, 2015, Pages 214-224, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.07.009>.
- López-Fernández, L., Lagüela, S., González-Aguilera, D., & Lorenzo, H. (2017). Thermographic and mobile indoor mapping for the computation of energy losses in buildings. *Indoor and Built Environment*, 26(6), 771–784. <https://doi.org/10.1177/1420326X16638912>
- Kirimtat, A \$, Krejcar, O. (2018) A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects, *Energy and Buildings*, Volume 176, 2018, Pages 390-406, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.052>.
- Mirzaei, P.A., & Zhang, R. (2015) Validation of a Climatic CFD Model to Predict the Surface Temperature of Building Integrated Photovoltaics, *Energy Procedia*, Volume 78, 2015, Pages 1865-1870, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.348>.

- Morón, C.; Saiz, P.; Ferrández, D. & Felices, R. (2018) Comparative Analysis of Infrared Thermography and CFD Modelling for Assessing the Thermal Performance of Buildings. *Energies* 2018, 11, 638. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/638>
- Nardi, I., Lucchi, E., De Rubeis, T., & Ambrosini, D. (2018) Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography, *Building and Environment*, Volume 146, 2018, Pages 190-205, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.050>.
- Natephra, W., Motamedi, A., Yabuki, N. & Fukuda, T. (2017) Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments, *Building and Environment*, Volume 124, 2017, Pages 194-208, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.004>.
- O'Grady, M., Lechowska, A. & Harte, A.M. (2018) Application of infrared thermography technique to the thermal assessment of multiple thermal bridges and windows, *Energy and Buildings*, Volume 168, 2018, Pages 347-362, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.034>.
- Rocha, J.H.A., Santos, C.F., & Póvoas, (2018) Evaluation of the infrared thermography technique for capillarity moisture detection in buildings, *Procedia Structural Integrity*, Volume 11, 2018, Pages 107-113, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.015>.
- Sfarra S., Cicone A., Yousefie, B., Ibarra-Castanedo, C., Perillia, S., & Maldague. X. (2019) Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools. *Energy and Buildings* Volume 182, 1 January 2019, Pages 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.017>
- Santos, L., Schleicher, S., & Caldas, L. (2017). Automation of CAD models to BEM models for performance based goal-oriented design method. *Building and Environment*, Volume 112, Pages 144-158, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.015>.
- Tejedor, B., Casals, M., & Gangoellés, M. (2018) Assessing the influence of operating conditions and thermophysical properties on the accuracy of in-situ measured U-values using quantitative internal infrared thermography, *Energy and Buildings*, Volume 171, 2018, Pages 64-75, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.011>.
- Taylor, T., Counsell, J. & Gill, S. (2014) Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building façades, *Energy and Buildings*, Volume 76, 2014, Pages 130-142, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.080>.