

# HACIA LOS GEMELOS DIGITALES TÉRMICOS DE EDIFICIOS CON ROBOTS

Alejandro López-Rey

Universidad de Castilla La Mancha, alejandro.lopezrey@uclm.es

Amanda Ramón

Universidad de Castilla La Mancha, amanda.ramon@uclm.es

Antonio Adán

Universidad de Castilla La Mancha, antonio.adan@uclm.es

Blanca Quintana Galera  
UNED, bquintana@ieec.uned.es

Juan García Aguilar

Universidad de Castilla La Mancha, juan.gaguilar@uclm.es

## Resumen

*Este artículo muestra la metodología desarrollada y los resultados obtenidos por el grupo 3DVC&R de la UCLM en la obtención de modelos térmicos de interiores de edificios con robots móviles. El documento revisa las etapas principales de planificación, adquisición de datos, procesamiento y creación del modelo geométrico-térmico semántico. El sistema y el método propuestos han sido experimentados con éxito en interiores de edificios a nivel de planta. Se presentan los resultados en un caso de estudio de 187 m<sup>2</sup> de superficie, con 5 zonas comunicadas por varias puertas. Este trabajo se considera un primer paso hacia la consecución de gemelos digitales térmicos de edificaciones en el entorno de la ingeniería, arquitectura y construcción.*

**Palabras clave:** Gemelo Digital, Digitalización de Edificios, Nubes Térmicas, Eficiencia Energética.

## 1. INTRODUCCIÓN

La investigación sobre gemelos digitales de edificios se está desarrollando muy rápidamente en los últimos cinco años gracias a que la tecnología actual proporciona más datos, cada vez más precisos y de forma más rápida. La irrupción de estas tecnologías de digitalización 3D en el mundo AIC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción) está suponiendo una revolución, ya que proporciona una valiosa información para monitorizar una construcción activa o de revisar una obra ya acabada.

Aunque, hasta ahora, la digitalización 3D de edificios ha estado orientada hacia objetivos puramente geométricos, en los comienzos de la última década de 2010 emergen artículos ([8]) en una nueva línea de

investigación derivada de la anterior, que es encaminada hacia el análisis y estudio de la eficiencia energética de los mismos. Se trata del nacimiento de los primeros trabajos orientados a la digitalización 3D térmica de edificios y, como consecuencia, a la creación de gemelos digitales térmicos.

En este artículo se presenta, en modo resumido, los pasos seguidos por los autores hacia la construcción automática de un modelo 3D digital térmico de un interior de un edificio utilizando un robot convenientemente sensorizado. En esta presentación, se incide mayormente en las primeras etapas relativas a la adquisición y preprocesamiento de datos. Por lo tanto, los siguientes párrafos introductorios se refieren únicamente a trabajos relativos a la obtención de nubes térmicas y a plataformas digitalizadores térmicas, dejando las referencias sobre tópicos de más alto nivel, como los de procesamiento de datos y creación de modelos 3D semánticos térmicos, para otras futuras publicaciones.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y APORTACIONES DEL TRABAJO

Como es sabido, la obtención de nubes densas de puntos se puede realizar a través de técnicas de escaneado láser ([5]), fotogrametría ([11]) o mediante cámaras RGB-D ([5, 11, 17]). El uso de cámaras infrarrojas junto a alguna de estas tecnologías para obtener una nube térmica en ámbitos de edificación se remonta al principio de los años 2010 con las publicaciones de Cho et al. [8] y Wang et al. [16]. En estas publicaciones se presentan los primeros sistemas y resultados de asignación de temperatura a puntos para una única imagen térmica.

En la actualidad, existen muy pocos grupos en el mundo que trabajen en la obtención de modelos térmicos completos ([9]). Casi todos estos grupos generan únicamente modelos de nube de puntos térmicos parciales y no estructurados, con o sin información de color. Por ejemplo, en [7], los autores trabajan con nubes de puntos térmicos de varias partes de un edificio y utilizan modelos de realidad aumentada para comparar estas nubes con mapas térmicos obtenidos mediante software comercial de simulación energética. Otros trabajos utilizan sensores que miden propiedades físicas junto con nubes incompletas de puntos térmicos en los que aún no se generan modelos 3D estructurados [6, 16].

Igualmente, existen escasas publicaciones sobre plataformas móviles autónomas que puedan capturar nubes de puntos térmicos. Kim et al. [14] presentan un método que extrae nubes de puntos térmicos de una escena muy simple, consistente en un pasillo, donde un robot se mueve escaneando desde varias posiciones. Además, la nube térmica obtenida, tomada en una sola sesión, no cubre completamente esta escena. En [6] los autores presentan un sistema compuesto por un robot móvil y un escáner térmico 3D. La nube de puntos térmicos calculada sólo cubre una franja de las paredes visibles. El tercer sistema resaltable, corresponde a la primera versión del sistema MoPAD (Plataforma Móvil para la Digitalización Autónoma) ([4]), que fue desarrollado en nuestro laboratorio en 2018 y donde se agregó una cámara térmica al sistema. Este primer prototipo proporcionó los primeros resultados prometedores de nubes de puntos térmicos 3D ([3]). Esta plataforma es ahora presentada en su segunda versión (MoPAD2), teniendo decisivas mejoras en cuanto a la toma, la gestión y el procesamiento de los datos.

En los trabajos referenciados anteriormente, el alcance de la digitalización térmica es aún muy reducido, no cubriendo totalmente el espacio de una planta o de un escenario con varias habitaciones.

Después de esta revisión bibliográfica, se puede decir que tres de las principales carencias de los sistemas de digitalización térmica actuales son:

- (1) Completitud. No se obtienen nubes completas (omnidireccionales) del entorno. La mayor parte de los sistemas extrae una franja de puntos con información térmica.
- (2) Nivel de alcance reducido. Únicamente se ha llegado a trabajar en habitaciones aisladas, pasillos o en envolventes exteriores de edificios.
- (3) Sistemas robotizados incompletos. La mayoría de las plataformas móviles son movidas o comandados por un usuario, y las pocas plataformas autónomas son incompletas, no pudiendo realizar tomas omnidireccionales.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este artículo es presentar de manera resumida y esquemática la metodología y los resultados obtenidos en la plataforma robotizada de digitalización térmica de edificios MoPAD2.

Las aportaciones de este trabajo, en el nuevo entorno de los gemelos digitales térmicos de edificios, son las siguientes:

- El sistema proporciona nubes térmicas completas (omnidireccionales) del entorno. No existen precedentes que aborden la creación nubes térmicas omnidireccionales.
- El sistema es autónomo en el aspecto temporal, siendo programado para realizar escaneos térmicos de la misma escena a intervalos de tiempo programados. No existen sistemas robotizados de digitalización térmica temporal.
- El sistema aumenta el escenario de actuación. Actualmente, el sistema presentado está trabajando con éxito a nivel de planta de edificio, mientras que sistemas similares están aún en un nivel de habitación.

### 3. METODOLOGÍA DE DIGITALIZACIÓN TÉRMICA TEMPORAL

#### 3.1 UNA VISIÓN GENERAL

Es comprensible que la solución al problema de obtención de nubes térmicas completas de edificios esté fuertemente condicionada por la tecnología y sensores utilizados, aunque también puede decirse que la metodología propuesta es exportable en sus aspectos principales a otras plataformas similares. En lo que sigue, supondremos los siguientes componentes básicos:

- Escáner láser 3D denso de alcance medio (<60m).
- Cámara de infrarrojos con campo de visión limitado.
- Plataforma Pan/Tilt.
- Robot móvil.
- Computador de última generación.

En la Figura 1 se muestra la plataforma MoPAD2 sobre la que se ha construido la metodología presentada en este artículo. Obviamente, posee más componentes que los anteriormente mencionados, pero de menor importancia y que podrían ser sustituidos por otros análogos.

La metodología de digitalización térmica propuesta consta de 4 fases, reflejadas en la Figura 2, que serán desarrolladas brevemente en las siguientes subsecciones. Estas son:

- (1) Planificación. Se establecen las posiciones y orientaciones de la plataforma sensorial.
- (2) Adquisición de datos. El robot pasa por las posiciones y la plataforma sensorial se orienta según lo establecido en la fase (1).
- (3) Procesamiento. Las nubes de puntos y las imágenes térmicas son convertidas en nubes térmicas omnidireccionales.
- (4) Modelo Térmico. Las nubes térmicas son procesadas obteniendo un modelo geométrico-térmico semántico.

En cada una de estas fases se crean sus respectivas bases de datos. La Figura 2 muestra un esquema que sintetiza estas cuatro fases.



Figura 1. Plataforma de digitalización térmica.

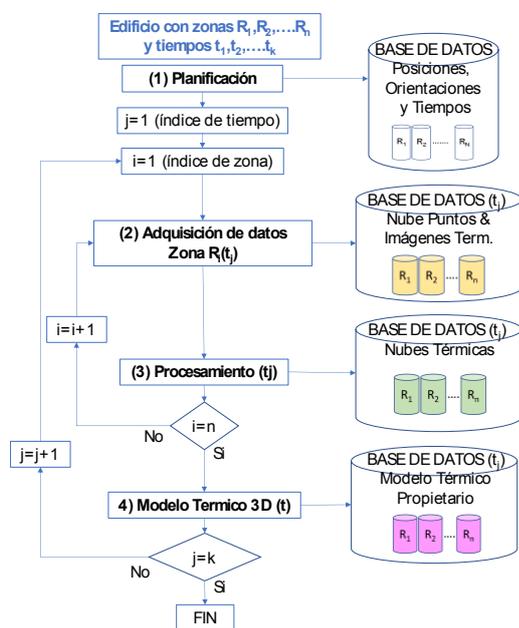


Figura 2. Metodología general para la digitalización térmica de edificios.

### 3.2 PLANIFICACIÓN

La planificación tiene por objetivo definir los lugares donde el robot debe detenerse y realizar un conjunto de escaneos térmicos siguiendo un conjunto de

especificaciones. Previamente, se inicializan todos los componentes y se realiza de forma comandada un mapa de la escena sobre la que se quiere calcular el modelo térmico final. Finalmente, el robot regresa a su posición *Home*.

Los parámetros fundamentales que se establecen en la planificación son:

- Intervalo de tiempo entre tomas repetidas.
- Resolución del escáner.
- Emisividad de la cámara térmica.
- Coordenadas del robot en cada posición escaneado.
- Orientaciones del robot.
- Ángulos del Pan/Tilt.

Toda la planificación queda almacenada en una base de datos (Figura 3).

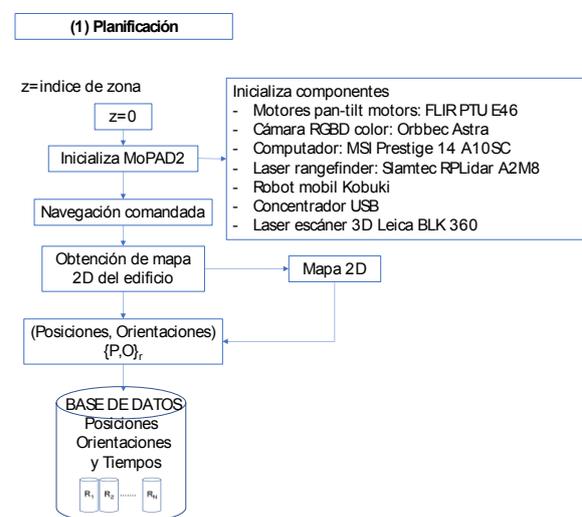


Figura 3. Esquema de la fase de planificación. La palabra “zona” se refiere a una parte del escenario, usualmente una habitación o sala con puerta.

### 3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

En el esquema de la Figura 4 se representan los distintos pasos de la fase de adquisición de datos. Hay que hacer notar que estos pasos se repiten a medida que el robot se sitúa en una nueva habitación (o zona) de la planta.

En el sistema sensorial hay que indicar que la cámara se mueve de forma solidaria con el escáner. Por lo tanto, el escáner y cámara térmica rotan solidarios sobre el eje vertical. El escáner cubre prácticamente todo el espacio con rangos 360° x 300° (h x v), mientras que la cámara térmica tiene un campo de visión (FoV) reducido, en nuestro caso 45° x 71° (h x v), por lo que se toman 10 fotogramas térmicos para cubrir un barrido de 360° del escáner.

A su vez, el cuerpo del escáner está anclado a una plataforma pan/tilt que permite al conjunto inclinarse en elevación y azimut. La rotación en azimut no es necesaria porque el mismo escáner ya la realiza. Como se aprecia en el esquema de la Figura 4, para una posición  $i$ -ésima del robot, puede haber distintas orientaciones (inclinaciones) del cuerpo del escáner. Esto es, de nuevo, necesario debido al reducido FoV de la cámara térmica, por lo que se inclina la cámara en varios ángulos para que cubra un ángulo vertical solapado cercano a los  $300^\circ$ . Normalmente, se hace un escaneado en posición vertical y sendos escaneados a  $+45^\circ$  y  $-45^\circ$  de inclinación vertical.

En este proceso, existe un subproceso intermedio de corrección de las imágenes térmicas captadas por la cámara. Entre otros aspectos, deben corregirse mediante una calibración de cuerpo negro ([13]), que es realizada con antelación, y del efecto aleatorio de variabilidad (repetitividad). Finalmente, se conforma una base de datos con las coordenadas de los puntos captados y de las imágenes corregidas de todas las zonas recorridas por el robot móvil.

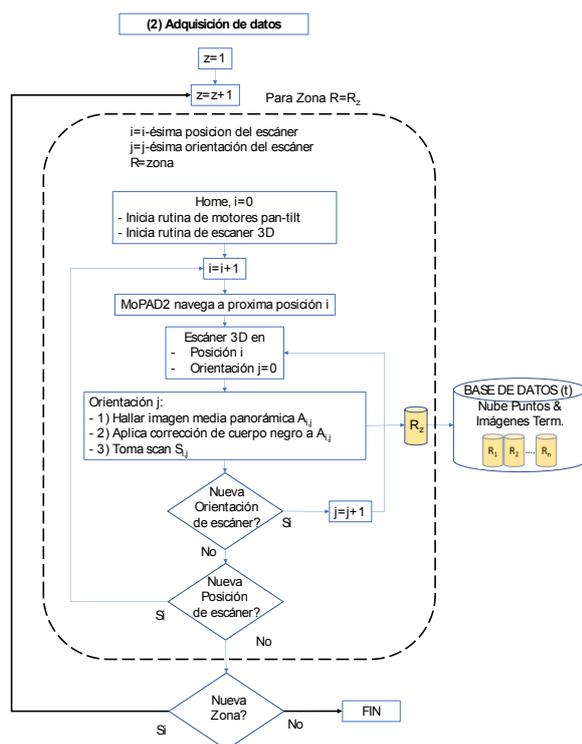


Figura 4. Fase de adquisición de datos para un tiempo  $t$ .

### 3.4 PROCESAMIENTO

La etapa de procesamiento de datos, representada en el esquema de la Figura 5, proporciona nubes térmicas omnidireccionales por cada una de las zonas de que consta la escena. Se puede dividir en las siguientes etapas:

- (1) Nube 360-T o nube térmica panorámica.

El problema de la asociación de puntos a temperaturas es previamente resuelto mediante una calibración externa entre escáner y cámara térmica [1]. La matriz de calibración proporciona la relación entre coordenadas de puntos en ambos sistemas de coordenadas, y es posteriormente utilizada para construir cada porción de nube térmica correspondiente a cada fotograma térmico.

Los ángulos en los que se toman los fotogramas a medida que gira el escáner, son introducidos en la ecuación de transformación anterior, de modo que la asignación sea la correcta.

- (2) Nube Omnidireccional Térmica

Desde una posición del robot, una nube omnidireccional térmica se obtiene con varias nubes 360-T tomadas con varias inclinaciones. Debido a que es conocida la geometría existente en el sistema pan/tilt y el cuerpo del escáner, la transformación entre ambos sistemas de referencia puede ser calculado con precisión a través de cinemática inversa. Por lo tanto, el registro entre nubes 360-T tomadas con distintas inclinaciones es un problema fácil de resolver.

Después del alineamiento entre conjuntos de nubes 360-T, se realiza una operación de reducción y regularización de la nube resultante acumulada, que será una nube omnidireccional desde una única posición de la plataforma.

- (3) Nube Omnidireccional Térmica de Zona

Es habitual que una zona no pueda ser digitalizada completamente desde una única posición, por lo que el robot necesitará varios escaneados omnidireccionales desde distintas posiciones.

Ahora, quien proporciona la necesaria relación entre sistemas de coordenadas del robot en distintas posiciones es la odometría del mismo. El vector de traslación y el ángulo de orientación relativo del robot son utilizados para alinear las correspondientes nubes térmicas obtenidas.

Hay que indicar que, tanto en la etapa (2) como en esta etapa, se utiliza el algoritmo de Iterative Closest Point ([12]) para refinar el proceso de registro entre nubes de puntos con solapamiento. Además, de nuevo se realiza una operación de reducción y regularización de la nube térmica acumulada que representa la información térmica con una alta resolución. Todas las nubes de

puntos térmicos omnidireccionales son guardadas en la base de datos correspondiente.

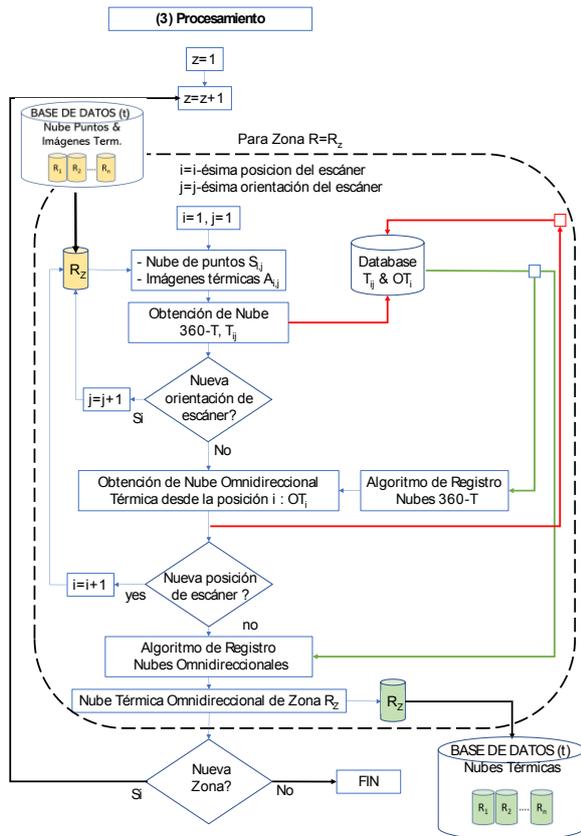


Figura 5. Esquema general de las tareas de procesamiento de datos para un tiempo t.

### 3.5 MODELO TÉRMICO

La creación de un modelo térmico conlleva una nueva etapa de procesamiento de medio y alto nivel sobre nubes 3D. Hasta ahora la nube térmica ha sido una colección de coordenadas y temperaturas desordenadas que están almacenadas en estructuras de datos no relacionados. Un modelo térmico semántico será una colección de primitivas (suelo, techo, pared, ventana, puerta, columna...) definidas por su geometría 3D, sus ortoimágenes térmicas, sus puntos de la nube asociados, su temperatura prototipo (o temperatura media de la primitiva), su tiempo y sus interrelaciones geométricas.

Para obtener el modelo térmico semántico se deben realizar distintos subprocesos (ver Figura 6), que brevemente son enunciados a continuación:

#### (1) Segmentación.

El primer paso consiste en segmentar las nubes omnidireccionales de cada zona en segmentos asociados a paramentos (suelo, techo, paredes y columnas). Asumiendo una estructura Manhattan en el interior del edificio, se han utilizado técnicas

basadas en M-estimator SAmple Consensus (MSAC) [15] para detectar zonas planas de puntos. Seguidamente, delimitados los segmentos, se generan ortoimágenes de color, profundidad y térmicas correspondientes.

#### (2) Reconocimiento.

La tarea de reconocimiento conlleva delimitar y etiquetar objetos arquitectónicos dentro de los paramentos segmentados anteriormente. En nuestro caso, se utilizan técnicas de reconocimiento de imagen sobre las ortoimágenes de color y profundidad obtenidas para cada paramento [2]. La salida de este subproceso son las facetas 3D correspondientes a puertas y ventanas.

#### (3) Asignación de propiedades a primitivas

Cada una de las primitivas calculadas tiene un conjunto de propiedades almacenadas en una estructura de datos. A cada primitiva se le asocian los valores de: coordenadas 3D de los vértices de la faceta que los delimita (en un sistema de referencia común), los valores de su temperatura media y el tiempo.

#### (4) Modelo Semántico Térmico

Finalmente, se lleva a cabo un procedimiento de cerramiento del volumen definido por todas las facetas de los paramentos. Este requisito es exigido para cualquier modelo que quiera ser importado con herramientas comerciales BIM (Building Information Model) o BEM (Building Energy Model). Este subproceso de cerramiento conlleva ajustar de forma precisa vértices de paramentos adyacentes, rehacer propiedades de adyacencia y corregir el sentido de la numeración de los vértices de todas las primitivas.

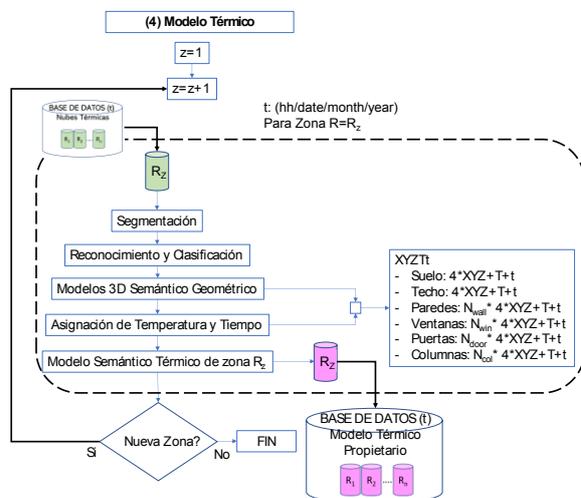


Figura 6. Fase de creación del modelo térmico.

#### 4. EXPERIMENTACIÓN DEL MÉTODO

La metodología propuesta en este artículo ha sido experimentada para obtener la digitalización térmica de interiores de edificios a nivel de zona y de planta, obteniendo modelos 3D térmicos semánticos para diferentes tiempos. En este artículo se muestran los resultados obtenidos en una parte de una planta de un edificio convencional con estructura Manhattan, compuesta por 5 zonas comunicadas por varias puertas. Este escenario, de unos 187 m<sup>2</sup> de superficie y 748 m<sup>3</sup> de volumen, tiene suficientes dimensiones y dificultad para poner a prueba la metodología presentada anteriormente.

Para digitalizar térmicamente este escenario, se han llevado a cabo 21 tomas de escáner en 7 posiciones del robot y 210 imágenes térmicas, teniendo un total de 250 millones de puntos. Esta misma sesión se ha repetido en tres ocasiones en el tiempo separadas 24 horas. El tiempo requerido en la fase de adquisición de datos por sesión es de unos 90 minutos. Gran parte de este tiempo se invierte en la toma de datos y en transferir los mismos desde el escáner al computador que porta el robot. Para cada toma 360-T se transfieren, entre otros datos, 18 millones de puntos y 10 imágenes térmicas.

La Figura 7 muestra la plataforma móvil MoPAD 2 en una zona de pasillo y en dos momentos en los que se realizan escáneres inclinados. La formación de una nube omnidireccional térmica desde una posición del robot es mostrada en la Figura 8, en donde se muestra en primer lugar la formación de una nube 360-T formada por 10 fotogramas térmicos desde una posición vertical. Otras dos nubes 360-T inclinadas son agregadas para formar la nube completa omnidireccional.

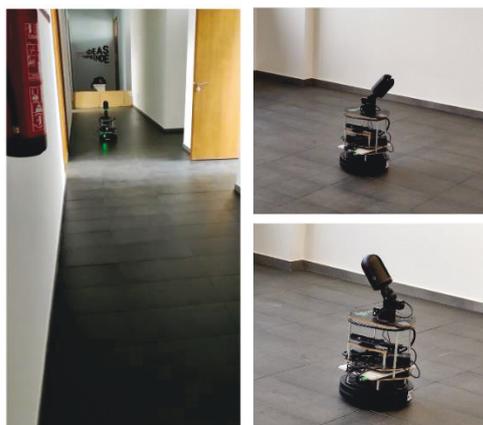


Figura 7. La plataforma MoPAD2 navegando y tomando datos con orientaciones inclinadas.

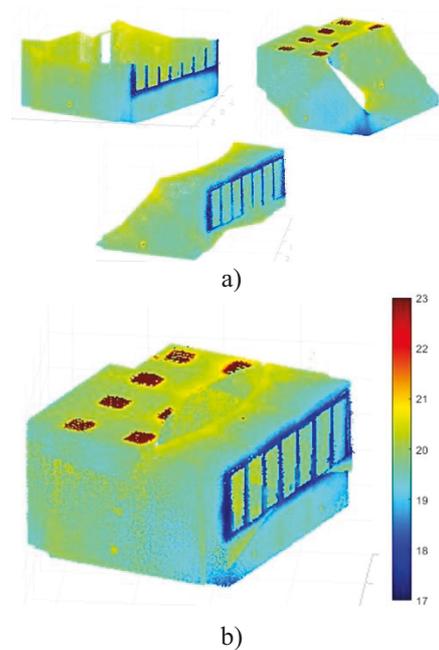
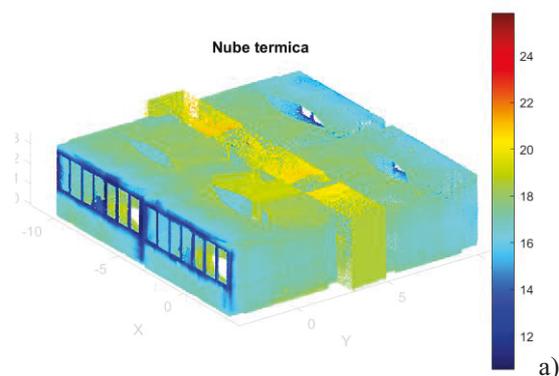


Figura 8. a) Nubes de puntos térmicas 360-T en una posición para tres orientaciones. Las tomas 2 y 3 corresponde a tomas inclinadas. b) Nube omnidireccional térmica de una zona.

La Figura 9 presenta la nube omnidireccional de todo el escenario desde el exterior (a)) e interior (b)). Se puede observar gradientes de temperaturas entre habitaciones que dan al exterior y el pasillo interior. Igualmente, en los paramentos que dan al exterior se distingue una menor temperatura en regiones del entorno de las ventanas. Esta nube proporciona información de temperatura para cada 4 cm<sup>2</sup>, por lo que se pueden procesar ortoimágenes térmicas de los paramentos con suficiente resolución, para después procesarlas y obtener interesante información de caracterización energética. Por último, en la Figura 10 se muestra el modelo 3D térmico semántico de la planta, con cada elemento estructural del escenario y su temperatura media asociada.



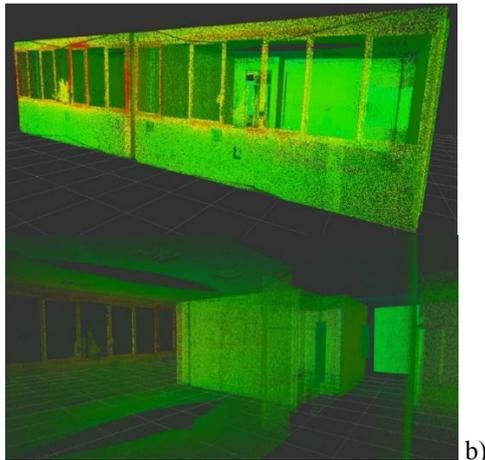


Figura 9. Vistas exteriores (a) e interiores (b) de la nube térmica omnidireccional del escenario completo.

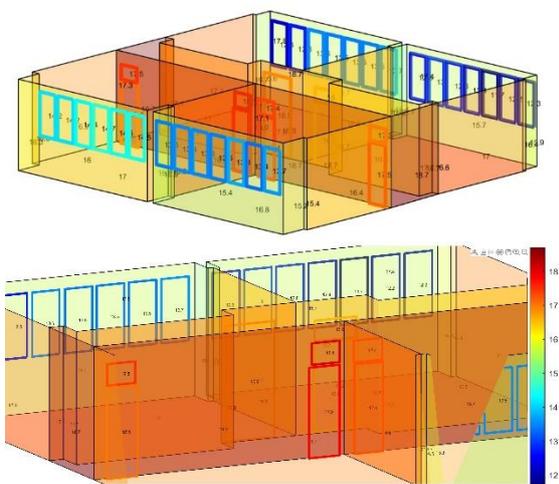


Figura 10. Modelo Térmico Semántico (vistas exterior e interior) con las temperaturas asociadas a cada elemento estructural.

## 5. CONCLUSIONES

El camino hacia la consecución de gemelos digitales térmicos de edificaciones en el entorno de la ingeniería, arquitectura y construcción está dando sus primeros pasos en los últimos años. Sin embargo, las propuestas actuales de automatización de este proceso con robots autónomos son aún inexistentes.

En el presente artículo, se ha mostrado una metodología encaminada a obtener un modelo digital térmico que está siendo aplicada con éxito en entornos de interiores de edificios. Sin embargo, existen importantes mejoras que deben acometerse antes de pasar a obtener gemelos digitales de mayor dimensión, como en edificios multiplanta. Estas mejoras se pueden sintetizar en los siguientes aspectos:

- La toma de datos es un aspecto fundamental que debe ser optimizado y automatizado en nuestro sistema. Se

necesitan algoritmos que calculen de forma automática las mejores posiciones y orientaciones del escáner, de modo que se tomen el mínimo número de tomas para cubrir toda la escena. Con esto, se reducirían tiempos y datos redundantes.

- Los algoritmos de reconocimiento y clasificación de primitivas deben ser más robustos ante cambios de iluminación de la escena. Además, se debe incorporar el componente térmico al algoritmo existente, basado en información de color y profundidad.

- El problema de repetitividad de la cámara térmica está parcialmente resuelto. Es necesario mejorar el procedimiento de filtraje de fotogramas *outliers*, en los que la temperatura sube o baja de forma aleatoria.

- Queda por realizar una gestión eficaz de datos y modelos 3D térmicos obtenidos en varias sesiones a tiempos distintos, de cara a caracterizar térmicamente el edificio en el tiempo.

Todas estas mejoras permitirán seguir avanzando en la investigación mostrada en este documento.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por los proyectos SBPLY/19/180501/000094 (European Regional Development Fund) y PID2019-108271RB-C31 (Ministerio de Ciencia e Innovación)

## English summary

### TOWARDS DIGITAL THERMAL TWINS OF BUILDINGS WITH ROBOTS

#### Abstract

*This article shows the methodology developed and the results obtained by the UCLM 3DVC&R group regarding thermal models of building indoors using mobile robots. The document reviews the main four stages of the method: planning, data acquisition, data processing and creation of the semantic geometric-thermal model. The proposed system and method have been successfully tested inside buildings at a floor level. The results are presented in a case study of 187 m<sup>2</sup> of surface, with 5 areas connected by doors. This work is considered as a first step that leads to the creation of thermal digital twins of buildings in the engineering, architecture and construction fields.*

**Keywords:** Digital Twins, Building Digitization, Thermal Point Clouds, Energy Efficiency.

#### Referencias

- [1] Adan, A. *et al.* (2017) ‘Fusion of thermal imagery and LiDAR data for generating TBIM models’, in *Proc. of IEEE Sensors*, pp. 1–3. doi:10.1109/ICSENS.2017.8234261.
- [2] Adán, A. *et al.* (2018) ‘Scan-to-BIM for “secondary” building components’, *Advanced Engineering Informatics*, 37, pp. 119–138. doi:10.1016/j.aei.2018.05.001.
- [3] Adán, A. *et al.* (2019) ‘An Autonomous Thermal Scanning System with Which to Obtain 3D Thermal Models of Buildings’, in *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*, pp. 489–496. doi:10.1007/978-3-030-00220-6\_58.
- [4] Adán, A. *et al.* (2020) ‘An autonomous robotic platform for automatic extraction of detailed semantic models of buildings’, *Automation in Construction*, 109. doi:10.1016/j.autcon.2019.102963.
- [5] Barazzetti, L. (2016) ‘Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds’, *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), pp. 298–311. doi:10.1016/j.aei.2016.03.005.
- [6] Borrmann, D. *et al.* (2014) ‘A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping’, in *Advanced Engineering Informatics*, pp. 425–440. doi:10.1016/j.aei.2014.06.002.
- [7] Chen, J., Fang, Y. and Cho, Y.K. (2018) ‘Performance evaluation of 3D descriptors for object recognition in construction applications’, *Automation in Construction*, 86, pp. 44–52. doi:10.1016/j.autcon.2017.10.033.
- [8] Cho, Y. and Wang, C. (2011) ‘3D thermal modeling for existing buildings using hybrid LIDAR system’, in *Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings*, pp. 552–559. doi:10.1061/41182(416)68.
- [9] Cho, Y.K., Ham, Y. and Golpavar-Fard, M. (2015) ‘3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art’, *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), pp. 184–195. doi:10.1016/j.aei.2015.03.004.
- [10] Demisse, G.G., Borrmann, D. and Nüchter, A. (2013) ‘Interpreting thermal 3D models of indoor environments for energy efficiency’, in *2013 16th International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2013*. doi:10.1109/ICAR.2013.6766550.
- [11] Fathi, H., Dai, F. and Lourakis, M. (2015) ‘Automated as-built 3D reconstruction of civil infrastructure using computer vision: Achievements, opportunities, and challenges’, *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), pp. 149–161. doi:10.1016/j.aei.2015.01.012.
- [12] J. Besl, P. and D. McKay, N. (1992) ‘A Method for Registration of 3-D Shapes’, *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 14(2), pp. 239–256.
- [13] Kim, H.-I. *et al.* (2022) ‘Thermal Design of Blackbody for On-Board Calibration of Spaceborne Infrared Imaging Sensor’, *Aerospace*, 9(5), p. 268. doi:10.3390/aerospace9050268.
- [14] Kim, P., Chen, J. and Cho, Y.K. (2017) ‘Robotic sensing and object recognition from thermal-mapped point clouds’, *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 1(3), pp. 243–254. doi:10.1007/s41315-017-0023-9.
- [15] Torr, P.H.S. and Zisserman, A. (2000) ‘MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry’, *Computer Vision and Image Understanding*, 78(1), pp. 138–156. doi:10.1006/cviu.1999.0832.
- [16] Wang, C., Cho, Y.K. and Gai, M. (2013) ‘As-Is 3D Thermal Modeling for Existing Building Envelopes Using a Hybrid LIDAR System’, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(6), pp. 645–656. doi:10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000273.
- [17] Wong, J.K.W., Ge, J. and He, S.X. (2018) ‘Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions’, *Automation in Construction*, pp. 312–326. doi:10.1016/j.autcon.2018.04.006.



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).