

05-017

## STATE OF THE ART OF THERMAL MODELLING OF BUILDINGS FROM POINT CLOUDS AND INFRARED THERMOGRAPHY.

Ferrer Gisbert, Pablo S. <sup>(1)</sup>; Vivancos Bono, José Luis <sup>(1)</sup>; Cañada Soriano, Mar <sup>(2)</sup>; Val Fiel, Mónica <sup>(3)</sup>; Vilar Abad, Alejandro <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Investigación en Dirección de proyectos, innovación y sostenibilidad (Universitat Politècnica de València), <sup>(2)</sup> Dpto. de Termodinámica Aplicada (Universitat Politècnica de València), <sup>(3)</sup> Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica

The development of geometric models of buildings in three dimensions from point clouds is a well-developed technology, but the operational integration of information from infrared thermography is a much more recent line of research in which few groups are currently working. The article aims to review the state of the art of this kind of models, and it will also include a summary of the main advances and challenges of the coordinated project ""5D Models: A new method for temporal thermal characterisation of buildings"" (PID2019-108271RB-C31) in which the authors participate.

Keywords: Thermal modelling of buildings; infrared thermography; energy efficiency.

## ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS TÉRMICOS DE EDIFICIOS A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS Y TERMOGRAFÍA INFRARROJA.

El desarrollo de modelos geométricos de edificios en tres dimensiones a partir de nubes de puntos es una tecnología bastante desarrollada pero la integración operativa en ellos de información a partir de termografía infrarroja constituye una línea de investigación bastante más reciente en la que actualmente pocos grupos trabajan. En el artículo se pretende hacer una revisión del estado del arte de este tipo de modelos y se incluirá además un resumen de los principales avances y retos del proyecto coordinado "Modelos 5D: Un nuevo método de caracterización térmica temporal de edificios" (PID2019-108271RB-C31) en el que los autores participan.

Palabras claves: Modelos térmicos de edificios; termografía infrarroja; eficiencia energética.

Correspondencia: José Luis Vivancos Bono      jvivanco@dpi.upv.es  
Pablo S. Ferrer Gisbert      pferrer@dpi.upv.es

Agradecimientos: Esta comunicación se enmarca dentro del proyecto "Nuevas Metodologías en el Análisis del Confort Térmico y la Eficiencia Energética en Edificios con Modelos 5d (PID2019-108271RB-C33)", financiado por la Agencia Estatal de Investigación.



## 1. Introducción

La obtención automática de modelos 3D de edificios mediante escáner es una técnica bastante desarrollada que ha cobrado interés con el auge más reciente de la implantación de los modelos BIM en el ámbito de la arquitectura e ingeniería (AEC por sus siglas en inglés).

Por otra parte, el sector de la construcción, que representa 36% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en la UE, debe recibir una atención prioritaria para lograr la neutralidad climática en 2050. Y la mayoría de las estrategias de renovación a largo plazo de los Estados miembros presentadas desde 2020 no cumplen con los objetivos de la “Directiva sobre la eficiencia energética de los edificios” para conseguir un parque de edificios de alta eficiencia energética y descarbonización para mediados de siglo (Staniaszek et al. 2021).

De ahí que la rehabilitación de edificios existentes presente también un gran potencial de mejora, constituyendo una actividad económica muy importante durante los próximos años. Para esta finalidad, el denominado BEM (Building Energy Modelling) está hoy día ampliamente aceptado pero su naturaleza a veces redundante respecto al BIM, el elevado tiempo de modelado y know-how específico que requiere, y la representatividad de sus resultados condicionada por las características reales del edificio simulado, constituyen aún limitaciones importantes.

Algunos autores han clasificado las causas de incertidumbre en este tipo de simulaciones en las siguientes cuatro categorías (Hopfe and Hensen 2011):

- 1- Modelización energética: la incertidumbre puede deberse a la simplificación o a las suposiciones de los modelos físicos del edificio o al algoritmo incorporado en el motor de simulación.
- 2- Especificación: imprecisiones en la especificación de los sistemas del edificio como la geometría, el rendimiento térmico de la envolvente, los horarios de ocupación, las propiedades de los materiales, etc.
- 3- Incertidumbre del escenario: suposición de las condiciones externas, como el clima exterior, o de las condiciones del edificio, como el comportamiento de los ocupantes.
- 4- Incertidumbre numérica: se producen errores numéricos durante el proceso de simulación, como la aproximación de las propiedades térmicas de los materiales.

Aunque el análisis detallado de las pérdidas de energía de los edificios y de las características de los sistemas energéticos mediante mediciones in situ, a través de auditorías, proporciona a los modelos de simulación energética información vital sobre el rendimiento de los sistemas del edificio, tampoco está libre de imprecisiones y requiere tiempo y mano de obra especializada.

Por todo ello, la obtención automatizada de modelos 3D de edificios no solo geométricos sino funcionales, y concretamente térmicos, puede presentar ventajas evidentes (. Por lo general, la mayoría de los defectos térmicos de los cerramientos se presentan de tres formas (humedad, fugas de aire y pérdida de calor por conducción) y se ven muy afectados por las condiciones meteorológicas externas. Para la detección de los mismos existen dos enfoques principales: la termografía infrarroja cualitativa y la cuantitativa. La primera se utiliza para determinar la presencia de anomalías térmicas mediante la evaluación visual de las diferencias de temperatura en el espectro de radiación medido (Comite Europeen de Normalisation 1998; Garrido et al. 2020). Mientras que la segunda, se basa en el análisis numérico para cuantificar las anomalías térmicas y se utiliza tanto para el diagnóstico térmico de la envolvente, como la determinación de la transmitancia térmica (Albatici, Tonelli, and Chiogna 2015; Tejedor et al. 2017). Su principal reto reside en que las condiciones meteorológicas externas pueden influir en la precisión de los resultados. Las irregularidades térmicas causadas por una alta transmitancia térmica se suelen examinar mediante

termografía cualitativa. En cambio, los puentes térmicos se detectan sobre todo mediante termografía cuantitativa.

Aunque el BIM tiene potencial para verificar el comportamiento térmico de los edificios mediante el uso de bases de datos, la integración de datos reales de calor superficial de las envolventes, temperaturas del aire y otros parámetros, supone una línea de investigación que todavía no ha sido ampliamente resuelta si bien cuenta con investigaciones de gran interés. En su trabajo, Lagüela et al. (2014) enriquecen el BIM *as-built* de una instalación, que ha sido generado de forma semiautomática mediante escaneo láser, con valores de las transmitancias de los cerramientos obtenidas mediante termografía. Recientemente, Natephra et al. (2017) proponen un método para recopilar datos ambientales y térmicos, e integrarlos al modelo BIM para poder analizar el rendimiento y confort térmico del edificio.

Así pues, la integración de datos reales de diferentes parámetros térmicos podría permitir la obtención de un modelo energético del edificio (BEM) o la validación de modelos existentes desarrollados mediante software de simulación energética o CFD. Aunque exigiría aspectos no inmediatos, como poder estimar la transmitancia de los cerramientos a partir de la información termográfica, también podría permitir utilizar dichos modelos para, por ejemplo, estimar el confort de los usuarios. Si además se logra integrar termografías correspondientes a distintos instantes de tiempo, el modelo podría no ser solo estático sino dinámico.

Con estas premisas y como continuación de uno anterior (DPI2016-76380-R, “Thermal BIM”) se ha iniciado el proyecto “Modelos 5D: Un nuevo método de caracterización térmica temporal de edificios” (PID2019-108271RB-C33). Este consta de tres subproyectos uno de los cuales, titulado “Nuevas metodologías y aplicaciones en caracterización térmica y eficiencia energética utilizando modelos 5D”, se centra en la aplicabilidad de los modelos térmicos generados y es el íntimamente relacionado con el presente artículo.

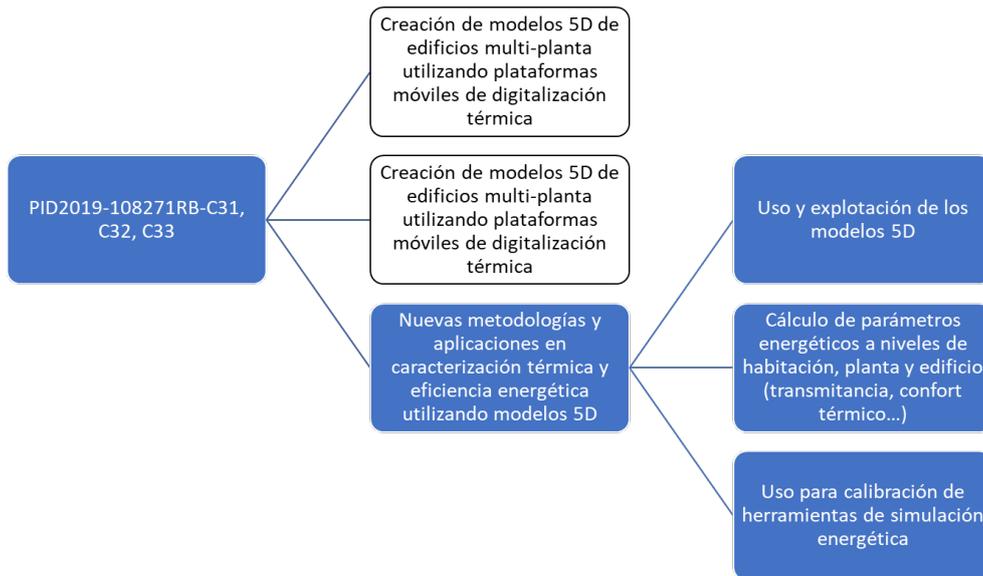
Dicho subproyecto se subdivide a su vez en varias líneas:

- Definición y cálculo del comportamiento térmico del edificio (incluyendo varios parámetros energéticos) en varios niveles (pared, habitación, suelo y edificio completo).
- Empleo de los datos reales contenidos en los modelos 5D para realizar calibraciones de algunas de las herramientas de software de simulación energética actuales.
- Establecimiento de un procedimiento para identificar puentes térmicos, zonas de riesgo o zonas que deben ser reparadas. Esta información podría utilizarse en los sistemas de certificación energética, o en edificios de difícil acceso o que presenten peligro.
- Además, la información térmica temporal puede utilizarse para analizar las propiedades energéticas a corto plazo (durante un día) o a medio plazo (según la estación o el mes de un año). En el futuro, estos modelos térmicos temporales podrán ser utilizados por los usuarios para optimizar el consumo de energía y por los

constructores como agentes que pueden modificar los materiales o las estructuras en la construcción.

En el presente artículo se pretende hacer una revisión del estado del arte de este tipo de modelos que, cuando incluyen la variable temporal, algunos autores denominan modelos 4D térmicos (Natephra et al. 2017).

**Figura 1: Líneas y sublíneas del proyecto**



## 2. Metodología

Metodología. Debe reorganizar este apartado de forma más coherente y clara. En la metodología se declara que se va a realizar una revisión bibliográfica sobre los modelos térmicos 3D. Sin embargo apenas aparecen tres o cuatro referencias que parecen escasas para una revisión sobre la temática propuesta. Un Diagrama de flujos que explique el proceso podría ayudar.

Para llevar a cabo el referido análisis del estado del arte se ha procedido a realizar una búsqueda en la Web of Science, Scopus y Google Académico de aquellas publicaciones correspondientes a modelos térmicos 3D con datos de termografía. De entre todas las referencias analizadas, y con el ánimo de realizar una clasificación previa de los resultados,

en este apartado se incluyen y discuten las propuestas en tres artículos específicamente de revisión del estado del arte encontrados.

(Cho, Ham, and Golpavar-Fard 2015) proponen la clasificación de métodos siguiente:

- a) Cámaras digitales y térmicas :
  - Métodos que facilitan la recopilación de grandes cantidades de imágenes térmicas.
  - Métodos que generan perfiles térmicos en 3D.
- b) Escaneo láser y cámaras térmicas.
- c) Sensores RGB-d y cámaras térmicas.
- d) Creación de BIM “as-built” para análisis energético:
  - Reconstrucción automática a partir de nubes de puntos LIDAR (Light Detection And Ranging).
  - Reconstrucción basada en imágenes.

Para el propósito del presente artículo, interesarían fundamentalmente propuestas englobadas en la categoría “d”.

En segundo lugar, (Sanhudo et al. 2018) identifican dos grupos de métodos para la combinación de información geométrica obtenida mediante escáner láser y termografía: el que denominan “correspondencia visual” y el empleo de modificaciones basadas en el formato gbXML. Mientras el primero se basa en la modificación de las texturas del modelo BIM incorporando información térmica visual, el segundo se centra en la definición de las propiedades térmicas de sus elementos. En el referido proyecto en el que los autores están implicados se pretende evolucionar desde un planteamiento inicial basado en el primer modelo hacia el segundo, para tratar de aprovechar mejor el potencial que los modelos BIM presentan.

En tercer lugar, (Gao, Koch, and Wu 2019) llevan a cabo una revisión de artículos publicados entre 2000 y 2018 relacionados con el BEM basado en BIM que clasifican en cuatro grupos:

- Métodos basados en IFC: formato de datos abierto, certificado ISO, utilizado por BIM.
- Métodos basados en gbXML: formato basado en XML, desarrollado específicamente para aplicaciones BEM por Autodesk Green Building Studio.
- Métodos basados en BIM Modelica: lenguaje de modelización orientado a objetos (OOPM) basado en ecuaciones.
- Otros desarrollos.

Cada uno de ellos los subdividen en las 6 etapas que debería tener un hipotético flujo de trabajo ideal: geometría, construcciones y materiales, tipos de espacios, zonas térmicas, cargas locales, y sistemas de climatización. Según los autores, la investigación futura no solo debería centrarse en el intercambio de información sino en cómo facilitar la toma de decisiones temprana a los diseñadores de edificios.

La vinculación de las herramientas BIM y BEM (en ocasiones también denominada BPS, building performance simulation, o BES, building energy simulation) constituye por tanto un campo de investigación activo. Existen numerosos artículos que se centran en el análisis de la interfaz entre las aplicaciones de ambos tipos para hacer de este un proceso que ahorre tiempo, sea de bajo costo, fácil de usar, más práctico, consistente y preciso (Gao et al. 2019), (Ramaji, Messner, and Mostavi 2020), (Kamel and Memari 2019). Actualmente, ninguno de

los principales motores de simulación de energía como EnergyPlus y DOE2 es capaz de importar directamente archivos BIM como gbXML e IFC desde herramientas CAD. Sin embargo, existe software con dicha capacidad que actúa como Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) de simulación de energía como OpenStudio, IES-VE, GBS, IDA ICE, RIUSKA. La interoperabilidad, por tanto, es esencial para optimizar la simulación energética y todavía queda mucho por hacer pero a este aspecto también dedicamos una ponencia específica en la presente edición del Congreso.

De la revisión llevada a cabo también se concluye que la inspección termográfica es la técnica dominante para detectar, analizar e informar sobre defectos térmicos (Cho et al. 2015) pero sigue basándose mayoritariamente en la aplicación directa de imágenes térmicas 2D y se necesita más investigación para determinar la fiabilidad de los resultados. Las mejoras relacionadas con la aplicación de termografía infrarroja al análisis de edificios se suceden y lo seguirán haciendo durante los próximos años (Garrido et al. 2020) por lo que a este aspecto concreto también dedicamos una ponencia específica en el presente Congreso.

### 3. Resultados

Desde hace algunos años, existen en el mercado aplicaciones para la exploración de imágenes térmicas 2D y nubes de puntos de edificios, pero no que procesen y exploren modelos térmicos 3D de edificios. Los avances en este último sentido son mucho más reducidos y se puede decir que, a día de hoy, existen pocos grupos en el mundo dedicados a la generación automática de modelos térmicos 3D de edificios utilizando sensores de largo alcance, y ninguno de ellos se encuentra en España.

En la Tabla 1 se detalla el aporte de la principal bibliografía consultada a los diferentes campos de investigación del proyecto. Entre las referencias menos recientes existen algunas cuya continuidad no ha podido constatarse. Así, Moghadam y otros (Moghadam, Vidas, and Lam 2014) mencionan la aplicación Spectra, un software que, a pesar de no estar especializado en la inspección de modelos de edificios, permite la representación simultánea de los espectros térmicos y visuales en una sola malla tridimensional, lo que, entre otras opciones, puede resaltar las zonas de temperatura extrema. Sin embargo, las publicaciones más recientes de Moghadam están relacionadas con nubes de puntos 3D LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) en grandes entornos exteriores SLAM (simultaneous localization and mapping).

En (Armesto et al. 2016), se describe un sistema integrado (IMAS) que permite obtener y procesar la información geométrica, termográfica y de confort en el interior del edificio de manera automatizada. Se miden los niveles de luz, temperatura y humedad con el objetivo posterior de comprobar el cumplimiento de la legislación vigente en materia de sanidad, confort y seguridad laboral bajo la que se construyó el edificio. En (Patiño-Cambeiro et al. 2017) se aplica dicho sistema y metodología al análisis de un edificio educativo. Entre las principales conclusiones destaca la identificación de la interoperabilidad entre BIM y BPS como una de las barreras significativas apuntando el uso de formatos de Open BIM (\*gbxml, \*ifc, or \*ifcxml) como línea de investigación futura.

En (Golparvar-Fard and Ham 2014), se presentó un método para el análisis y visualización automática de las desviaciones entre los estados de energía reales y simulados de un edificio. El método propuesto se basa en los entornos de realidad aumentada del rendimiento energético (EPAR) en los que se generan modelos espacio-térmicos tridimensionales (3D) reales y esperados y se superponen en un entorno virtual 3D común. El método aprovecha

colecciones desordenadas de imágenes térmicas y digitales para el modelado del rendimiento en

energético real, además del análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) para la simulación del rendimiento energético esperado. Con ello se pretende que los auditores de edificios puedan ahorrar tiempo de análisis manual de imágenes térmicas para centrarse en la evaluación de los problemas detectados y sus posibles soluciones.

El grupo de robótica y telemática de la Universidad de Wurzburg, Alemania, dirigido por el profesor Dr. Andreas Nüchter, ha desarrollado la denominada “3DTK: The 3D Toolkit” (Anon n.d.). Aunque la información disponible en la página web activa es básicamente de la parte geométrica de la herramienta, los autores también han publicado resultados respecto a la implementación térmica (Borrmann, Elseberg, and Nüchter 2013)(Borrmann et al. 2012). El sistema robótico que desarrolla un modelo 3D completo del entorno, combinando la imagen térmica con la tecnología de escaneo láser terrestre, se expone de manera detallada en la tesis doctoral de Borrmann (Borrmann 2017). Entre las múltiples aplicaciones posibles también se propone un método para detectar la estructura desde el interior de los edificios así como la detección y clasificación de ventanas. La herramienta podría ser también de aplicación en ámbitos diferentes como la arqueología o la geología incorporando otros tipos de sensores.

Otro grupo cuyos trabajos están relacionados con estos temas es el Robotics & Intelligent Construction Automation Lab, School of Civil and Environmental Engineering. Instituto de Tecnología de Georgia, EE.UU (Cho n.d.). El grupo está dirigido por el Dr. Yong K. Cho y cuenta con una plataforma móvil autónoma de captura de nubes de puntos pero no de temperatura ya que está más especializado en otras aplicaciones relacionadas con la seguridad o el mantenimiento.

En (Natephra et al. 2017), se propuso un sistema para la visión cualitativa y cuantitativa de la información térmica y la evaluación de las condiciones requeridas para el confort térmico en un edificio. El sistema convierte las imágenes térmicas recogidas en temperaturas superficiales numéricas, integra los datos ambientales recogidos en el BIM y evalúa el nivel de confort térmico para varias ubicaciones dentro del edificio. Par ello se utilizó la herramienta Rhinoceros con su plug-in Grasshopper. El sistema también permite al usuario ver los cambios de temperaturas en el modelo BIM a lo largo del tiempo. Como líneas futuras apuntan el desarrollo de un método para registrar los datos ambientales y la información térmica en el BIM utilizando los recursos IFC existentes y ampliar la capacidad del sistema para evaluar el confort térmico interior en edificios climatizados utilizando los métodos “predicted mean vote” (PMV) y “peak particle velocity” PPV.

(Dino et al. 2020) presentan una reconstrucción 3D basada en imágenes que contribuye al modelado semiautomático de edificios existentes. Aunque el grueso del artículo se dedica a los aspectos geométricos, realizan una comparativa entre los resultados obtenidos y una simulación realizada con EnergyPlus. También estiman los valores de transmitancia térmica de las paredes externas mediante un método basado en la termografía infrarroja.

(Garwood et al. 2018) presentan un modelo para capturar y procesar rápidamente la geometría as-built de fábricas u otros edificios de gran escala, para ser utilizada en BEM, almacenando la geometría en un formato de lenguaje gbXML. A diferencia del lenguaje IFC, que presenta un área de aplicación más amplia y avanzada en la industria de la AEC, el gbXML se centra en permitir el intercambio de datos entre el BIM y el software de análisis de energía (Sanhudo et al. 2018).

Una propuesta muy interesante y reciente, relacionada con la calibración de envolventes de BEM existentes utilizando drones equipados con sensores de termografía, se presenta en (Bayomi et al. 2021). El estudio se centra concretamente en la automatización de las

estimaciones de las transmitancias de las envolventes pero también permite reflejar la degradación de los materiales, los puentes térmicos y los fallos de aislamiento mediante imágenes térmicas. En el caso de estudio expuesto, se consigue una mejora del rendimiento del BEM del 21,8% al 0,9% y se resuelven problemas como la inaccesibilidad física a determinados componentes del edificio, como los tejados. El método también podría utilizarse para la evaluación de edificios múltiples, a nivel de vecindario, con el fin de examinar e identificar los escenarios de rehabilitación más eficaces.

**Tabla 1: Campos cubiertos por las referencias analizadas**

	Modelos térmicos		Segmentación	Nube de puntos	Técnicas LIDAR	Termografías aplicadas	Interoperabilidad BIM-BEM
	2D	3D					
(Adán et al. 2020)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(Sadhukhan et al. 2020)	✓		✓				✓
(Armesto et al. 2016)		✓		✓	✓	✓	
(Bayomi et al. 2021)	✓					✓	✓
(Borrmann 2017)		✓	✓	✓	✓	✓	
(Borrmann et al. 2012)		✓	✓	✓	✓	✓	
(Borrmann et al. 2013)		✓		✓	✓	✓	
(Cho et al. 2015)		✓		✓	✓	✓	✓
(Dino et al. 2020)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(Garrido et al. 2020)	✓					✓	
(Garwood et al. 2018)				✓	✓		✓
(Golparvar-Fard and Ham 2014)		✓		✓		✓	
(Kamel and Memari 2019)							✓
(Moghadam et al. 2014)		✓				✓	
(Natephra et al. 2017)	✓	✓				✓	
(Patiño-Cambeiro et al. 2017)				✓		✓	✓
(Ramaji et al. 2020)							✓
(Sanhudo et al. 2018)							✓

#### 4. Conclusiones y líneas futuras

La automatización de la obtención de modelos energéticos de edificios a partir de datos reales de temperatura interior y superficial obtenidos mediante termografía infrarroja constituye un campo de investigación relativamente reciente en el que existen todavía pocos grupos activos trabajando de manera específica.

El actual proyecto de investigación, de tres años de duración, comenzó a finales de 2020 y se halla todavía en sus inicios. Como se ha podido comprobar a través de la presente revisión, la interoperabilidad entre los modelos BIM y BEM es esencial para optimizar la simulación energética y la explotación de resultados pero, a día de hoy, sigue constituyendo una barrera significativa. Por otra parte, siguen produciéndose avances en cuanto al empleo de la termografía infrarroja cuantitativa para la determinación o ajuste de las transmitancias de los cerramientos en los modelos. Respecto a aplicaciones más detalladas, existen propuestas sobre el análisis del confort térmico en las que se apuntan métodos más sofisticados como trabajos en desarrollo.

Algunas iniciativas proponen la utilización de robots similares para el reconocimiento y clasificación de objetos como máquinas, tuberías, cables, etc., incluso la explotación en ámbitos distintos como la arqueología o la geología. En nuestro caso, la aplicación del robot en entornos industriales relacionados con procesos térmicos se ha apuntado como interesante tras esta primera etapa centrada en edificación.

Entre las limitaciones a las que se procurará dar solución mediante el proyecto de investigación en curso se encuentran (Adán et al. 2020):

- La autonomía energética del sistema es bastante limitada. Las baterías suministran energía al robot, los sensores y los dos ordenadores de a bordo, lo que implica detener el proceso de escaneo cada cuatro horas para recargarlas.
- Hasta ahora, el sistema sólo es aplicable a los interiores de los edificios. Los exteriores también podrían escanearse pero la mayoría de los algoritmos de adquisición deberían adaptarse o reprogramarse totalmente. Para tal fin, el empleo de drones podría suponer un método complementario muy interesante.
- Durante la fase de adquisición de datos, no se permite la presencia de personas ni de objetos en movimiento ya que podría suponer una fuente de ruido de temperatura en la escena.

#### 5. Referencias

- Adán, Antonio, Blanca Quintana, Juan García Aguilar, Víctor Pérez, and Francisco Javier Castilla. 2020. "Towards the Use of 3D Thermal Models in Constructions." *Sustainability* 12(20):8521. doi: 10.3390/su12208521.
- Albatici, Rossano, Arnaldo M. Tonelli, and Michela Chiogna. 2015. "A Comprehensive Experimental Approach for the Validation of Quantitative Infrared Thermography in the Evaluation of Building Thermal Transmittance." *Applied Energy* 141:218–28. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.035.
- Anon. n.d. "3DTK The 3D Toolkit." Retrieved March 30, 2021a (<http://slam6d.sourceforge.net/>).
- Anon. n.d. "An Innovative Framework of 5D BIM Solutions for Construction Cost Management \_ A Systematic Review \_ Enhanced Reader."
- Armesto, Julia, Claudio Sánchez-Villanueva, Faustino Patiño-Cambeiro, and Faustino Patiño-Barbeito. 2016. "Indoor Multi-Sensor Acquisition System for Projects on Energy

- Renovation of Buildings.” *Sensors (Switzerland)* 16(6):1–14. doi: 10.3390/s16060785.
- Bayomi, Norhan, Shreshth Nagpal, Tarek Rakha, and John E. Fernandez. 2021. “Building Envelope Modeling Calibration Using Aerial Thermography.” *Energy and Buildings* 233:110648. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110648.
- Borrmann, Dorit. 2017. “Multi-Modal 3D Mapping - Combining 3D Point Clouds with Thermal and Color Information.” Wurzburg.
- Borrmann, Dorit, Jan Elseberg, and Andreas Nüchter. 2013. “Thermal 3D Mapping of Building Façades.” *Advances in Intelligent Systems and Computing* 193 AISC(VOL. 1):173–82. doi: 10.1007/978-3-642-33926-4\_16.
- Borrmann, Dorit, Andreas Nüchter, Marija Dakulović, Ivan Maurović, Ivan Petrović, Dinko Osmanković, and Jasmin Velagić. 2012. “The Project ThermalMapper - Thermal 3D Mapping of Indoor Environments for Saving Energy.” *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 45(22):31–38. doi: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00045.
- Cho, Yong K. (Georgia Institute of Technology). n.d. “ROBOTICS & INTELLIGENT CONSTRUCTION AUTOMATION LAB -R I C A L-.” Retrieved March 30, 2021 (<http://rical.ce.gatech.edu/>).
- Cho, Yong K., Youngjib Ham, and Mani Golparvar-Fard. 2015. “3D As-Is Building Energy Modeling and Diagnostics: A Review of the State-of-the-Art.” *Advanced Engineering Informatics* 29(2):184–95. doi: 10.1016/j.aei.2015.03.004.
- Comite Europeen de Normalisation. 1998. *EN 13187 Thermal Performance of Buildings - Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes - Infrared Method (ISO 6781:1983 Modified)*.
- Dino, Ipek Gursel, Alp Eren Sari, Orcun Koral Iseri, Sahin Akin, Esat Kalfaoglu, Bilge Erdogan, Sinan Kalkan, and A. Aydin Alatan. 2020. “Image-Based Construction of Building Energy Models Using Computer Vision.” *Automation in Construction* 116. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103231.
- Gao, Hao, Christian Koch, and Yupeng Wu. 2019. “Building Information Modelling Based Building Energy Modelling: A Review.” *Applied Energy* 238:320–43.
- Garrido, I., S. Lagüela, R. Otero, P. Arias, Universidade De Vigo, Centro De Investigación, Procesos Industriais, Applied Geotechnologies, and Campus Universitario. 2020. “Thermographic Methodologies Used in Infrastructure Inspection : A Review — Post-Processing Procedures.” *Applied Energy* 266(February):114857. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114857.
- Garwood, Tom Lloyd, Ben Richard Hughes, Dominic O’Connor, John K. Calautit, Michael R. Oates, and Thomas Hodgson. 2018. “A Framework for Producing GbXML Building Geometry from Point Clouds for Accurate and Efficient Building Energy Modelling.” *Applied Energy* 224:527–37. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.046.
- Golparvar-Fard, Mani, and Youngjib Ham. 2014. “Automated Diagnostics and Visualization of Potential Energy Performance Problems in Existing Buildings Using Energy Performance Augmented Reality Models.” *Journal of Computing in Civil Engineering*. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000311.
- Hopfe, Christina J., and Jan L. M. Hensen. 2011. “Uncertainty Analysis in Building Performance Simulation for Design Support.” *Energy and Buildings* 43(10):2798–2805. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.06.034.
- Kamel, Ehsan, and Ali M. Memari. 2019. “Review of BIM’s Application in Energy Simulation:

Tools, Issues, and Solutions.” *Automation in Construction* 97:164–80.

Lagüela, S., L. Díaz-Vilariño, J. Armesto, and P. Arias. 2014. “Non-Destructive Approach for the Generation and Thermal Characterization of an as-Built BIM.” *Construction and Building Materials* 51:55–61. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.021.

Moghadam, Peyman, Stephen Vidas, and Obadiah Lam. 2014. “Spectra: 3D Multispectral Fusion and Visualization Toolkit.” *Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA 02-04-Dece*(December).

Natephra, Worawan, Ali Motamedi, Nobuyoshi Yabuki, and Tomohiro Fukuda. 2017. “Integrating 4D Thermal Information with BIM for Building Envelope Thermal Performance Analysis and Thermal Comfort Evaluation in Naturally Ventilated Environments.” *Building and Environment* 124:194–208. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.004.

Patiño-Cambeiro, Faustino, Guillermo Bastos, Julia Armesto, and Faustino Patiño-Barbeito. 2017. “Multidisciplinary Energy Assessment of Tertiary Buildings: Automated Geomatic Inspection, Building Information Modeling Reconstruction and Building Performance Simulation.” *Energies* 10(7). doi: 10.3390/en10071032.

Ramaji, Issa J., John I. Messner, and Ehsan Mostavi. 2020. “IFC-Based BIM-to-BEM Model Transformation.” *Journal of Computing in Civil Engineering* 34(3):04020005. doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000880.

Sadhukhan, Debanjan, Sai Peri, Niroop Sugunaraj, Avhishek Biswas, Daisy Flora, Katelyn Koiner, Andrew Rosener, Matt Dunlevy, Neena Goveas, David Flynn, and Prakash Ranganathan. 2020. “Estimating Surface Temperature from Thermal Imagery of Buildings for Accurate Thermal Transmittance ( U-Value ): A Machine Learning Perspective.” *Journal of Building Engineering* 32(June):101637. doi: 10.1016/j.jobe.2020.101637.

Sanhudo, Luís, Nuno M. M. Ramos, João Poças Martins, Ricardo M. S. F. Almeida, Eva Barreira, M. Lurdes Simões, and Vítor Cardoso. 2018. “Building Information Modeling for Energy Retrofitting – A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89:249–60.

Staniaszek, Dan, Judit Kockat, Rutger Broer, and Xerome Fernández Álvarez. 2021. *The Road to Climate-Neutrality. Are National Long-Term Renovation Strategies Fit for 2050?*

Tejedor, Blanca, Miquel Casals, Marta Gangoells, and Xavier Roca. 2017. “Quantitative Internal Infrared Thermography for Determining In-Situ Thermal Behaviour of Façades.” *Energy and Buildings* 151:187–97. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.040.

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

