

Soluciones para la digitalización y la prefabricación en la rehabilitación energética de edificios

Solutions for digitisation and prefabrication in the energy refurbishment of buildings

Nagore Tellado-Laraudogoitia¹,
Natalia Lasarte¹, Olga Macías¹, Kepa Iturralde²,
Thomas Bock² e Yvon Sebesi³

¹ TECNALIA (España)

² Technical University of Munich (Alemania)

³ DIETRICH (Francia)

DOL: <http://dx.doi.org/10.6036/9280>

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción tiene un gran impacto en nuestro medioambiente, tanto en términos de consumo de energía como de emisiones de CO₂ a la atmósfera. En Europa más del 70% de los edificios fueron construidos antes de la primera crisis energética (década de los años 70) [1]. La mayoría de estos edificios fueron construidos sin ninguna consideración energética, de hecho, los aspectos energéticos no se incluyeron en los Códigos Técnicos de los edificios hasta la trasposición de la Directiva 2002/91/EC (Directiva EPBD) a los estados miembros.

Para poder cumplir los objetivos del Protocolo de Kyoto [2] es necesario concentrarse en la mejora de la eficiencia energética del parque edificado existente. Sin embargo, a pesar de que el sector rehabilitación energética de edificios es un gran mercado potencial para el sector de la construcción, éste no acaba de despegar. Los motivos son varios, pero principalmente se debe al coste de la intervención y el alto periodo de retorno de la inversión debido al bajo coste de la energía [3].

La digitalización del sector de la construcción incorporando nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia de los procesos y la fabricación en masa de soluciones de rehabilitación, podría reducir los costes de intervención y facilitar una economía de escala que impulsara el mercado de la rehabilitación energética de edificios.

Existen numerosas tecnologías a aplicar en los procesos de la construcción (BIM, láser escáner, drones, etc.) y numerosas soluciones para rehabilitación con módulos prefabricados. Sin embargo,

al contrario que en otros sectores industriales, la adopción práctica de estas de tecnologías ha sido mínima, porque pese a que la tecnología está plenamente desarrollada, las dificultades en su uso e implementación no están aún resueltas.

Este artículo muestra los resultados obtenidos en el marco del proyecto BERTIM [4] donde se ha puesto en práctica un proceso de digitalización de todo el proceso de rehabilitación energética de edificios, desde la captura de datos hasta la instalación de los módulos, llevada a cabo con módulos prefabricados en madera. La apuesta por la madera está ganando relevancia debido a su baja demanda de energía primaria y su huella de carbono [5], aunque su presencia en los países del sur de Europa sigue siendo muy inferior respecto al Norte de Europa donde su empleo principalmente en obra nueva está muy extendido [6]. El proceso ha servido para identificar y solventar las dificultades de llevar proposiciones teóricas a la práctica. En el proyecto se han identificado tres puntos críticos:

- La captura de datos adecuados del edificio para la creación de un modelo BIM preciso.
- La dificultad de la rehabilitación de los sistemas HVAC del edificio por el interior debido a los requerimientos de espacio interior y de la intrusividad de la ejecución.
- La instalación de módulos prefabricados de geometría plana sobre una fachada de un edificio que no es plana ni regular.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. CAPTURA DE DATOS DEL EDIFICIO PARA LA CREACIÓN DE UN MODELO BIM

En la actualidad la toma de datos del edificio para el diseño del proyecto de rehabilitación se realiza de forma manual y en muchos casos sobre papel, siendo necesario después trasladarlos a un forma-

to digital. Por otro lado, cada agente que participa en la rehabilitación realiza su propia toma de datos duplicando en muchos casos los esfuerzos innecesariamente. Para mejorar la eficiencia de este proceso se propone una única toma de datos digital y la creación de un único modelo BIM para todos los agentes involucrados.

Se compararon tres técnicas de captura de datos diferentes, mediante tres herramientas diferentes con el objetivo de evaluar la precisión que aportan y su coste-beneficio en la creación del modelo BIM del edificio:

- El 3D láser escáner con la tecnología Lidar terrestre
- Dron con cámara fotográfica para tecnología de fotogrametría
- Estación total para topografía punto a punto del edificio.

Dos de las tecnologías, la tecnología Lidar terrestre y la fotogrametría, apoyan el concepto de nube de puntos, mientras que la tercera tecnología utiliza un análisis punto por punto. Esta herramienta es muy habitual en topografía donde la precisión habitual que se requiere es del orden del centímetro, mientras que para la fabricación de módulos prefabricados para rehabilitación la precisión debe de ser del orden del milímetro, concretamente se recomienda un máximo de 10mm.

El edificio que se tomó para la comparación era un edificio de baja más tres plantas, con una geometría irregular por su diseño arquitectónico y que además presentaba una falta de planitud en las fachadas de hasta 5 cm.

La toma de datos con el láser escáner se realizó colocando el dispositivo en diferentes posiciones alrededor del edificio. Se tomó especial precaución en la toma de datos de las ventanas, dado que desde algunas posiciones no se podía tener de forma precisa los puntos de los alfeizares. Por ello se eligieron con detalle las posiciones de escaneo, con 13 posiciones alrededor del edificio (28.106 densidad de puntos por rotación; 7.67mm entre puntos en un rango de 10 m) suplementado con 43 escaneos desde el interior del edificio frente a cada una de las ventanas (44.106 densidad de puntos por rotación; 6.14mm entre puntos en un rango de 10m). El post-procesado de los puntos se realizó con Trimble RealWorks, siendo este

post-procesado bastante automático hoy en día, uniendo los puntos en una única nube y eliminando objetos no deseados como transeúntes o mobiliario de la calle. Además, con el láser escáner también se tomaron fotografías panorámicas en 360 grados desde cada posición, resultando en una imagen muy realista del edificio, facilitando así la interpretación de los detalles arquitectónicos del edificio.

La fotogrametría se realizó mediante el vuelo de un dron sobre el mismo edificio a varias alturas para poder tomar múltiples ángulos. La cámara no mide distancias por lo que es necesario ajustar la nube de puntos que se obtiene a la escala adecuada mediante la calibración con puntos tomados con una estación total desde diferentes ángulos. Se tomaron 30 puntos de calibración. Estos puntos se unieron con Pix4D y fueron importados a RealWorks donde se calibró la nube de puntos, y se realizó la limpieza de puntos quitando los innecesarios.

Con ambos métodos la toma de datos se realizó en un día, el post-procesado de los puntos requirió entre dos y tres días. Los modelos 3D a partir de las nubes de puntos se crearon con Revit. Esta parte del proceso no está aún automatizada sino que es un trabajo manual, y es la que más tiempo consumió requiriéndose de 5 a 6 días.

Por último, se llevó a cabo el escaneo del edificio con una estación total de LEICA con una precisión de 2mm+2 ppm. El tiempo requerido para obtener los puntos con la estación total es superior a los otros dos métodos, además el coste en personal se ve incrementado porque se necesitan entre 3 y 4 personas para llevar a cabo la campaña de medidas, mientras que en los otros dos métodos con 2 personas es suficiente.

Las medidas realizadas con la estación total, tuvieron como resultado que el 20%

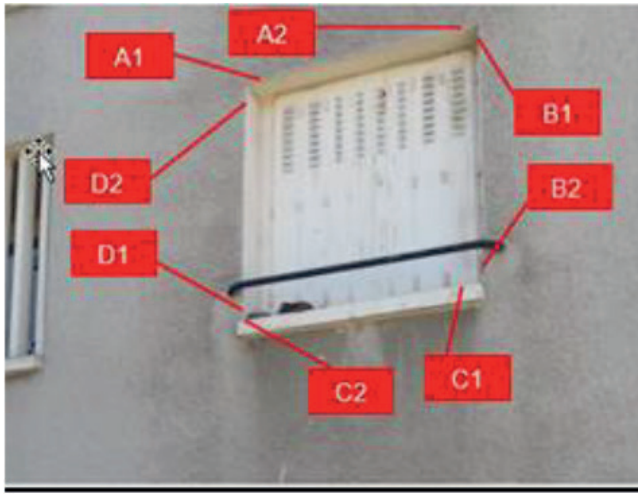


Fig. 1: Izda: diana objetivo que permite identificar los puntos de medida con una estación total; Dcha: puntos de medida alrededor de la ventana [Fuente: proyecto BERTIM]

de los puntos obtenidos era errático. Principalmente estos errores se dieron cercanos a los límites de las ventanas e irregularidades, siendo necesario repetir las medidas. Para abordar esta dificultad se ideó un procedimiento muy sencillo. Una diana dibujada en un pequeño cartón (Fig. 1) colocado en los límites que se desean identificar permitiría al técnico asegurar que está midiendo los puntos adecuados.

2.2. MÓDULOS PREFABRICADOS INTEGRANDO INSTALACIONES HVAC

2.2.1. Diseño de los módulos prefabricados de madera

Los módulos prefabricados que se han propuesto para la rehabilitación energética de edificios son de marco de madera (también llamado "timber frame"). El marco de madera cuenta con listones interiores, una lámina OSB (*Oriented Strand Board*) en la parte posterior, está relleno de aislamiento y protegido después por una lámina impermeabilizante.

Sin embargo, esta propuesta queda incompleta dado que no considera la re-

habilitación de las instalaciones obsoletas de HVAC (calefacción, refrigeración y ventilación) del edificio.

En el proyecto se trabajó en el diseño de unos módulos de instalaciones, que pudieran albergar las redes de distribución (conductos y tuberías) de HVAC y permitir la rehabilitación de los sistemas de climatización sin necesidad de intervenir por el interior de la vivienda. Para ello los módulos de "timber frame" no son una solución adecuada dado que los marcos de madera impiden que las tuberías y los conductos de aire tengan continuidad. Para salvar este problema, se optó por diseñar los módulos de instalaciones con módulos autoportantes de CLT (*Cross laminated timber*).

2.2.2. Viabilidad de las dimensiones de los módulos de instalaciones

Una barrera era el espesor de los módulos de instalaciones hacia el exterior de la fachada, tanto por las dimensiones de los conductos de distribución de HVAC, como por el aislamiento necesario sobre los mismos para evitar pérdidas de energía.

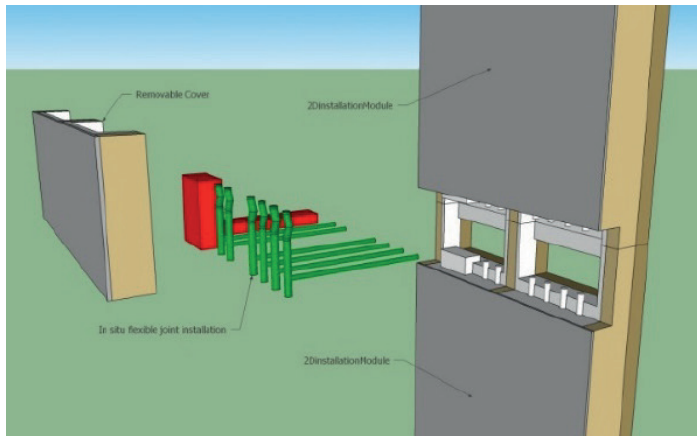


Fig. 2: Módulo de instalaciones BERTIM. Las piezas en forma de T acoplan tuberías y conductos de dos módulos y penetran en las viviendas. [Fuente: proyecto BERTIM]



Fig. 3: Izda: Identificación de las zonas para la distribución de módulos en el muro; Centro: Estrategia 1: sistema tradicional de instalación; Dcha: Estrategia 2: instalación con el sistema Matching Kit [Fuente: proyecto BERTIM]

Para evaluar las dimensiones de los conductos de distribución, se tomó como caso de estudio un edificio residencial ubicado en Madrid. El edificio tiene orientación norte-sur. En la fachada norte están la cocina y los baños y en la fachada sur están los dormitorios y el salón. El edificio en su estado actual dispone de sistemas individuales de calefacción alimentados por caldera de gas y radiadores como unidades terminales. La intervención propuesta consistía en centralizar el sistema de generación (la caldera) aprovechando los emisores existentes y dotar a la vivienda de ventilación mecánica y aire acondicionado centralizados. Los generadores se colocarían en cubierta y la distribución se realizaría por la fachada, integrando las tuberías y conductos en los módulos de instalaciones BERTIM.

Se analizaron dos escenarios, uno donde el edificio era de baja más cuatro plantas con dos viviendas por planta y un segundo donde el edificio tendría 11 plantas, también con dos viviendas por planta.

Para analizar el espesor de aislamiento necesario se trabajó sobre el mismo caso de estudio: el edificio residencial en Madrid. El módulo de instalaciones propuesto fue el desarrollado por el fabricante de madera EGOIN (<https://egoin.com/>), que comprende aislamiento de lana de roca (espesor = 140 mm). La conductividad de referencia del aislamiento es de 0,038 W/ (m K). Los espesores mínimos para los conductos los establece el *Reglamento instalaciones térmicas en los edificios* (en adelante RITE) [7]. Partiendo de estos valores se realizó un cálculo de pérdidas de energía mediante un análisis de flujos de calor bidimensional realizado con un software de análisis dinámico.

En España, según el RITE, el valor máximo de la pérdida instantánea de energía en las redes de distribución debe ser como máximo del 4% de la energía generada. Por lo tanto, el concepto desarrollado de

distribución integrada en la fachada solo sería viable si el diseño puede garantizar que las pérdidas de distribución sean similares a este valor.

2.3. INTEGRACIÓN DEL MÓDULO CON LA FACHADA EXISTENTE: NUEVOS MÉTODOS DE INSTALACIÓN

La rehabilitación con módulos prefabricados tiene como beneficio una rápida instalación "in situ". Sin embargo la falta de planimetría de la fachada existente podría hacer inviable el uso de módulos prefabricados. Para solventar esta dificultad a la hora de instalar los módulos, se propusieron dos soluciones que tenían como objetivo que los módulos tuvieran tolerancias menores de 2mm en la posición relativa.

Las dos soluciones se demostraron en un muro de testeo de unos 5x10 metros. En primer lugar, se realizó un escaneo 3D del muro generando una nube de puntos que permitió medir las desviaciones de la fachada. La desviación máxima fue de 20mm.

Se evaluaron dos estrategias para la instalación de los módulos, las cuales se muestran la Figura 3:

- **Estrategia 1:** Se realizaron en las Zonas 1 y 2. Es la manera "más tradicional" para colocar un módulo. Los módulos de la Zona 2 se apoyaron sobre dos perfiles de acero (en rojo) de forma que se alinearon adecuadamente. Los módulos superiores en la Zona 1 se colocaron sobre los inferiores, que actuaron a modo de guía.
- **Estrategia 2:** Se realizaron en las Zonas 3 y 4. Se colocaron unas placas de madera sobre el muro, cuatro por módulo, (en azul). Se midió, mediante un teodolito digital, las coordenadas precisas de cada una de las placas. Al ser la pared irregular, las placas no estaban en un mismo pla-

no perpendicular al suelo. Se generó una interfaz (llamado Matching Kit o MK). El interfaz MK es un nuevo desarrollo el proyecto BERTIM. Fue fabricado en madera en una máquina CNC y colocado sobre las placas en la pared. Es quien absorbe las irregularidades del muro y consigue la verticalidad necesaria. Dependiendo de la "falta de verticalidad" de la pared, el grosor de la interfaz variará pudiendo llegar a ser todos los interfaces diferentes entre sí en paredes de alta irregularidad. Sobre el interfaz MK se colocaron 4 conectores por módulo, que ahora si respetaban la planimetría necesaria.

A continuación, sobre el módulo BERTIM se colocaron otros 4 conectores que encajaban con los ya colocados sobre el interfaz MK.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CAPTURA DE DATOS DEL EDIFICIO PARA LA CREACIÓN DEL MODELO BIM

Una vez generado el modelo BIM del edificio con los tres métodos de captura de datos anteriormente descritos, se compararon los resultados obtenidos. En primer lugar, se compararon los resultados a partir de las nubes de puntos. La siguiente imagen superpone los resultados obtenidos con el láser escáner (gris) frente a los obtenidos con la fotogrametría (marrón).

En la Figura 4 se aprecia que:

- En el muro anterior hay una diferencia de 9 cm en su posición
- En las ventanas hay discrepancias de hasta 5 cm
- En la fachada posterior la diferencia es aún superior al espesor de la propia fachada

Por lo que se confirmó lo que la literatura ya anticipaba, el modelado a partir

de la nube de puntos no proporciona una precisión suficiente para aplicarlo al escaneo de edificios para la rehabilitación con módulos prefabricados.

A continuación, se analizaron los datos obtenidos con la estación total. Para nuestro experimento se extrajeron en formato txt en cuatro columnas: el número del punto y las tres coordenadas cartesianas x, y, z. El número del punto facilita la conexión de los puntos para crear líneas y planos. El resultado obtenido tras el post-procesado resultó de una precisión adecuada para prefabricación de los módulos, ofreciendo un plano preciso y sin errores.

Los módulos obtenidos mediante este método se fabricaron e instalaron en un edificio en la Charité sur Loire (Francia) por el fabricante de viviendas en madera POBI (www.pobi.fr). Se obtuvo una gran precisión en la posición de los huecos de las ventanas y puertas y la ejecución fue un éxito, demostrando realmente que la captura de datos con la estación total es la técnica más adecuada en la actualidad.

3.2. MÓDULOS PREFABRICADOS INTEGRANDO INSTALACIONES HVAC

3.2.1. Diseño de los módulos prefabricados de madera

El diseño es técnicamente viable. El precio de los módulos con un acabado en láminas de madera es de 130€/m2 una vez instalado. Considerando los precios de la energía actuales en España el periodo de retorno estimado es entre 15-20 años. Los edificios que permitan aumentar una planta con un apartamento residencial (puede ser un módulo prefabricado en madera) podrán utilizar su venta para costear la inversión.

El precio de los módulos de instalaciones varía en función de los equipos de generación que se instalen.

3.2.2. Viabilidad de las dimensiones de los módulos de instalaciones

La viabilidad de los módulos de fachada de CLT para albergar los conductos de HVAC depende de que no sobresalgan en exceso de la fachada del edificio.

Tras el análisis realizado sobre la distribución de los conductos en los dos escenarios de viviendas de cinco y once plantas se establece que la distribución más conveniente es:

- La fachada norte (cocina y baños) debe contener la extracción de la ventilación, las tuberías para el agua caliente sanitaria y los circuitos de calefacción.
- La fachada sur (dormitorios y salón)

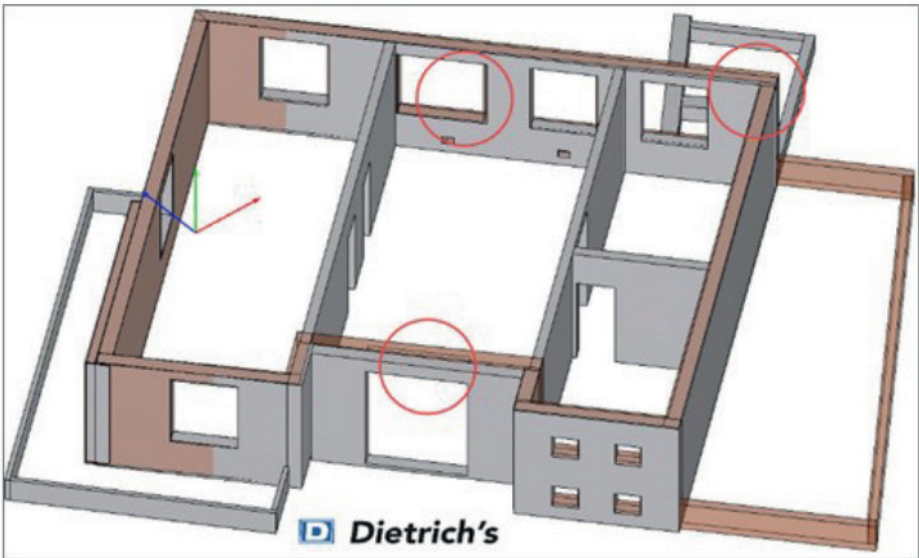


Fig. 4: Comparación de los modelos BIM obtenidos de las nubes de puntos obtenidas con láser escáner y fotogrametría. [Fuente: proyecto BERTIM]

debe contener la impulsión de la ventilación y las tuberías del circuito de refrigeración.

Por geometría conviene tener dos módulos de instalaciones independientes para cada mano. Es decir, dos módulos similares en la fachada norte y otros dos similares en la sur.

El conducto que establece la dimensión total del módulo es el conducto de ventilación:

- Para el edificio de cinco alturas se obtiene que para cada una de las manos del edificio es necesario un conducto de ventilación con una sección mínima de 400 cm².
- Para el edificio de once alturas se obtiene que para cada una de las manos es necesario un conducto de

ventilación una sección mínima de 1.100 cm².

Esta última sección se establece como un máximo de aplicación del módulo de instalaciones BERTIM. De hecho, si fueran necesario utilizar conductos superiores a 1100 cm² no podría haber un único punto de entrada y de salida por vivienda, sino que debería haber varios puntos en cada una de ellas. Otras soluciones singulares podrían ser incrementar la velocidad del aire dentro de los conductos de aire con un adecuado aislamiento acústico o utilizar conductos que paulatinamente se vayan estrechando, aunque esto dificultaría considerablemente la instalación.

Las necesidades de aislamiento del módulo de instalaciones se obtuvieron partiendo de los valores de aislamiento

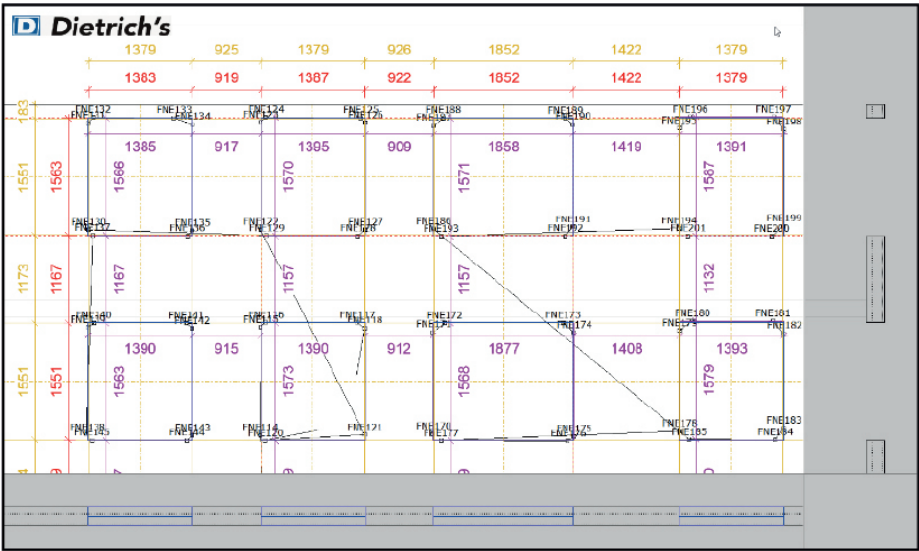


Fig. 5: Plano de fabricación CAD/CAM a partir de los puntos de la estación total. [Fuente: proyecto BERTIM]

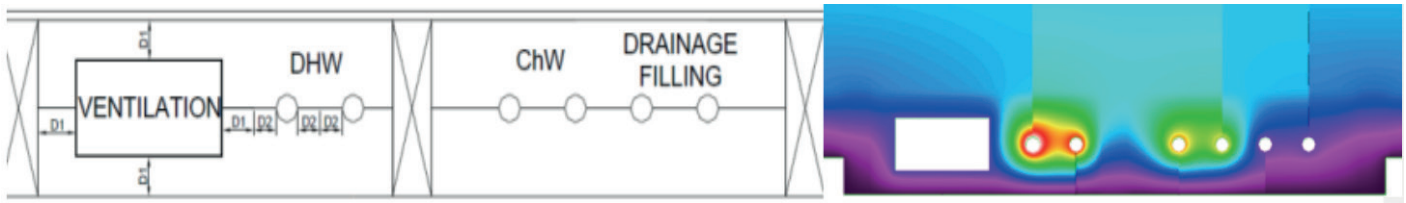


Fig. 6: Flujos de calor para evaluar las pérdidas térmicas del módulo de instalaciones. [Fuente: proyecto BERTIM]

establecidos por el RITE. Se consideraron los siguientes valores de partida: D1 espesor de aislamiento mínimo para un conducto exterior: 50mm; D2 espesor de aislamiento mínimo para una tubería exterior con fluidos calientes y ACS: 35mm y 40mm respectivamente; y D3 espesor de aislamiento mínimo para una tubería exterior con fluidos fríos: 45mm (Fig. 6)

Considerando dichos valores y las condiciones climáticas de Madrid la siguiente figura muestra el resultado del cálculo de pérdidas de energía: las pérdidas en los tubos de agua caliente para calefacción y ACS eran del orden de 7.18 W/m, frente a un límite establecido por la regulación de 3.40 W/m y las pérdidas en los tubos de agua fría para refrigeración eran de 2.97 W/m, frente a un valor normativo del RITE de 2.01 W/m.

Para salvar esta dificultad se optó por colocar un aislante con una conductividad de 0.032 W/m K y por aumentar el grosor del aislamiento D1 en 80mm llegando a un aislamiento total de 130mm. Con estos cambios las pérdidas se redujeron hasta un valor de 3.59 W/m en agua caliente y 0.93 W/m en agua fría, ordenes de magnitud de los valores normativos.

Considerando el aumento del aislamiento por el exterior de los tubos de ventilación, la sección del módulo de instalación tendría un grosor de 303mm, más el grosor del panel de CLT (75mm). Es decir, el módulo de instalaciones tendría un espesor aproximado de 40 cm más el acabado.

Estos resultados han sido obtenidos considerando las condiciones climáticas de Madrid. Cuanto más frío sea el clima más pérdidas de calor habrá en los conductos de agua caliente, y más aislamiento se requerirá. Por lo tanto, en los climas extremadamente fríos, los módulos de instalaciones para calefacción y ACS no serían factibles.

3.3. INTEGRACIÓN DEL MÓDULO CON LA FACHADA EXISTENTE: NUEVOS MÉTODOS DE INSTALACIÓN

Los resultados obtenidos con los dos sistemas de instalación fueron satisfactorios respecto al tiempo de montaje,

donde se necesitaron como media, unas 0,10 horas de trabajo por metro cuadrado ejecutado. Si se compara con los métodos tradicionales manuales (entre 1,3 y 1,6 h/m²), se observa una disminución relevante. En cuanto a la precisión, se consiguieron desviaciones relativas de 2mm. por lo que este aspecto también fue cubierto.

Los reducidos tiempos de instalación in situ son la gran ventaja competitiva de la solución BERTIM.

4. CONCLUSIONES

- La digitalización del proceso de rehabilitación con módulos prefabricados tiene impacto principalmente en la reducción de los tiempos de instalación *in-situ*, reduciéndose en un 90% frente al SATE. El coste instalado aproximado es de 130€/m², del orden de magnitud de la fachada ventilada pero aún muy superior al SATE.
- La captura de datos geométricos del edificio para la realización de un modelo BIM requiere de una precisión de orden de magnitud del milímetro.
 - La captura de datos con láser escáner y fotogrametría, requieren de 2 personas durante un día, pero no tienen la suficiente resolución.
 - La captura de datos con la estación total es la que más tiempo consume, y requiere de 3 o 4 personas para llevarlo a cabo, sin embargo, es la única que ofrece la precisión adecuada. Para asegurar que se miden los puntos correctos, se ha visto la necesidad de colocar unas dianas objetivo sobre la fachada.
- La viabilidad de la rehabilitación energética de los sistemas de climatización de un edificio integrando las redes de distribución tiene dos limitaciones:
 - En el Norte de Europa los espesores de aislamiento necesarios para limitar las pérdidas de energía en los conductos pueden hacer inviables estas intervenciones.
 - Se establece como máximo un edificio de 10 alturas. Más allá el espesor del módulo haría inviable su integración en el edificio.

- La falta de verticalidad de las paredes de los edificios podrían hacer inviable el uso de módulos planos. Se han demostrado dos técnicas de instalación que permiten absorber estas irregularidades e instalar los módulos en tiempos muy reducidos.

REFERENCIAS

- [1] EUROPEAN COMMISSION. Energy, Climate change and environment. EU Buildings Database [en línea]. Disponible en internet: <https://ec.europa.eu/energy/en/eu-buildings-database>
- [2] UNITED NATIONS. United Nations Conventions on Climate Change. Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount. Bonn, Germany 2008. ISBN 92-9219-055-5
- [3] COMISIÓN EUROPEA. Informe de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones. Precios y costes de la energía en Europa. Bruselas, 2019
- [4] EUROPEAN UNION'S HORIZON 2020 RESEARCH AND INNOVATION PROGRAMME. BERTIM project [en línea]. Disponible en internet: www.bertim.eu
- [5] Bergman R, Puettmann M, Taylor A, et al. "The Carbon Impacts of WoodProducts". Forest products journal: 2014.Vol. 64 No. 7/8 p. 220-231. DOI: <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00047>
- [6] Hildebrandta J, Hagemann N, Thrän D. "The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe". Sustainable Cities and Society. Vol. 34 p.405-418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013>
- [7] ESPAÑA. MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Boletín Oficial del Estado, 29 de agosto de 2007, núm. 207.p. 35931- 35984.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren reconocer al proyecto BERTIM como marco principal del presente estudio, proyecto a su vez financiado bajo el programa H2020 de la Unión Europea, nº contrato 636984, sobre Rehabilitación energética de edificios con módulos prefabricados en madera, y agradecer a todos los miembros de su consorcio las contribuciones técnicas y científicas.