

TECNOLOGÍAS DISRUPTIVAS DE INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA PARA LA DESCARBONIZACIÓN URBANA

Roberto Díaz Rubio¹, Caterina Chirico Rodríguez², Celia Peces Martín³

¹ NOTIO-Centro Tecnológico de Actividades de la Construcción de Castilla-La Mancha, Toledo, España, roberto.diaz@notio.es

² NOTIO-Centro Tecnológico de Actividades de la Construcción de Castilla-La Mancha, Toledo, España, caterina.chirico@notio.es

³ NOTIO-Centro Tecnológico de Actividades de la Construcción de Castilla-La Mancha, Toledo, España, celia.peces@notio.es

Resumen

La transición hacia la neutralidad climática exige descarbonizar el entorno construido. En este campo tienen especial importancia los entornos históricos, donde la instalación de soluciones convencionales de soluciones generadoras de energía renovable es prácticamente inviable. Se presentan dos tecnologías disruptivas que integran la generación de energía renovable y el mantenimiento de la identidad cultural de los conjuntos urbanos con valor patrimonial.

Se analizan dos líneas de investigación y desarrollo: el proyecto SUSTAINFLOOR que presenta un pavimento modular fabricado con residuos de construcción y generador de energía eléctrica, y el proyecto CECOM4PV que propone el desarrollo de tejas cerámicas curvas con integración de sistemas de generación de energía fotovoltaica así como estrategias de ventilación pasiva e industrialización.

Los resultados, a nivel de prototipo (TRL6), demuestran la viabilidad técnica de integrar energías renovables sin alterar la estética patrimonial. El desarrollo concluye que es posible fusionar vanguardia tecnológica y conservación, ofreciendo soluciones constructivas que superan las barreras normativas de los cascos históricos, avanzando hacia la sostenibilidad urbana sin comprometer el legado arquitectónico.

Palabras Clave: Transición energética, Economía circular, Descarbonización, Energías renovables.

1 Introducción

La transición hacia sistemas energéticos de bajas emisiones es, en la actualidad, uno de los desafíos estructurales más relevantes para la sociedad. El sector de la construcción y el medio urbano concentran cerca del 40% del consumo final de energía y originan más del 30% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [1]. La estrategia europea hacia la neutralidad climática en 2050, plantea un desafío técnico especialmente complejo en centros históricos y entornos de valor patrimonial, donde la aplicación de soluciones convencionales de eficiencia energética se ve limitada por restricciones normativas, morfológicas y paisajísticas [2].

En los últimos años se han llevado a cabo numerosas iniciativas que buscan impulsar el desarrollo de energías renovables; sin embargo, la implementación práctica en contextos patrimoniales sigue encontrando obstáculos vinculados a la compatibilidad estética, la reversibilidad de las actuaciones y el respeto a la materialidad histórica [3]. Polo-López y Frontini

[4] documentaron distintos casos de incorporación de elementos BIPV en edificios históricos, destacando la dificultad de establecer soluciones válidas.

En este marco, el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) en la fabricación de pavimentos urbanos energéticamente activos representa una oportunidad significativa para avanzar simultáneamente en sostenibilidad material y generación energética. La valorización de RCD para la fabricación de pavimentos y elementos constructivos de alto valor añadido y elevadas prestaciones, se alinea con los principios de la economía circular al promover la reincorporación de materiales al ciclo productivo, reducir la extracción de recursos naturales y minimizar los impactos ambientales asociados a la gestión de residuos [5]. Estudios recientes en esta temática, demuestran la viabilidad e interés que existe en la integración de sistemas piezoeléctricos en baldosas y pavimentos para transformar la energía cinética generada por el tránsito peatonal en electricidad utilizable, configurando superficies urbanas capaces de producir energía de forma distribuida [6-8]. Un aspecto particularmente relevante en este trabajo es la posibilidad de incorporar estos dispositivos bajo pavimentos convencionales o piezas superficiales compatibles con el entorno histórico, lo que permite que la tecnología pase prácticamente desapercibida desde el punto de vista visual, sin alterar el espacio urbano ni comprometer los valores patrimoniales, mientras aporta al espacio su funcionalidad energética. Esta característica resulta clave para su aplicación en entornos sensibles, favoreciendo la aceptación social y la compatibilidad con criterios de conservación.

El presente trabajo aborda la compatibilización entre conservación arquitectónica y generación energética renovable mediante el desarrollo de soluciones constructivas innovadoras aplicables tanto en el espacio urbano como en los edificios históricos. Se presentan los avances alcanzados en los proyectos SUSTAINFLOOR y CECOM4PV: el primero orientado a la activación energética del plano horizontal urbano a través de pavimentos piezoeléctricos fabricados con RCD; el segundo, al diseño de cubiertas cerámicas fotovoltaicas compatibles con la conservación patrimonial mediante tecnología BIPV.

2 Metodología

El enfoque metodológico se basa en un desarrollo experimental aplicado, dirigido a diseñar, fabricar y validar prototipos constructivos capaces de generar energía renovable sin alterar la apariencia del entorno. El trabajo se organiza en dos líneas complementarias:

- Pavimentos piezoeléctricos basados en residuos valorizados (SUSTAINFLOOR).
- Integración fotovoltaica en cubiertas cerámicas tradicionales mediante tecnología BIPV (CECOM4PV).

En ambos casos se han seguido fases de diseño conceptual, fabricación de prototipos, caracterización físico-mecánica, evaluación energética y validación en condiciones reales.

2.1 Desarrollo de pavimento generador de energía (SUSTAINFLOOR)

La metodología del proyecto SUSTAINFLOOR se orienta al diseño y validación de un sistema de pavimento modular capaz de captar energía generada por las pisadas de los peatones mediante dispositivos piezoeléctricos integrados en una matriz elaborada con RCD.

La primera etapa comprende el diseño conceptual y constructivo de la baldosa modular (Figura 1). Para alojar los dispositivos piezoeléctricos en posiciones estratégicas que maximicen el rendimiento del sistema, se fabrica mediante impresión 3D un molde específico que incorpora las

cavidades y geometrías de posicionamiento necesarias. Este procedimiento asegura la correcta alineación de los sensores, facilita su integración durante el proceso de fabricación y garantiza la reproducibilidad geométrica de la pieza.

En una primera etapa se desarrolló el diseño constructivo del módulo (Figura 1), incluyendo cavidades internas destinadas a alojar los elementos piezoeléctricos en posiciones estratégicas. Para garantizar precisión y reproducibilidad del módulo, se fabricó un molde mediante impresión 3D. El molde asegura la correcta alineación de los sensores piezoeléctricos a la vez que facilita su integración durante el proceso de fabricación.



Figura 1. Diseño conceptual del sistema de pavimento generado de energía desarrollado en el marco del proyecto SUSTAINFLOOR

De forma paralela, se investigó la formulación del material base empleando como componente principal RCD, junto con pequeñas proporciones de polvo de acetato de vinilo de etileno (EVA) y resina orgánica como aglomerante. Se realizaron caracterizaciones granulométricas y químicas, y se seleccionó finalmente una mezcla optimizada:

75% RCD + 5% EVA + 20% resina.

Los ensayos de validación se efectuaron conforme a la norma UNE-EN 1339 para pavimentos de hormigón de uso exterior en zonas de alto tránsito, aplicando cargas cíclicas de entre 80 y 120 kg en compresión para reproducir el efecto de las pisadas. Los resultados obtenidos en el prototipo se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales resultados de validación

Propiedad	Resultado SUSTAINFLOOR	Valoración
Resistencia a flexión	7 MPa	Cumple
Carga de rotura	1.300 N	Cumple
Heladicidad	100 ciclos sin defectos	Cumple
Resistencia a impacto	60 mm	Cumple
Permeabilidad	Estanco 7 días en inmersión	Cumple
Reducción de peso	-36% vs. baldosa convencional	Mejora destacada

Además, se realiza un análisis comparativo de la huella de carbono del producto respecto a una baldosa de hormigón convencional. Este análisis se realiza conforme a la norma UNE-EN ISO 14067, y se limita a los módulos A1–A3 (extracción de materias primas, transporte a planta y fabricación —estudio "de cuna a puerta"—), siguiendo el principio de prudencia. Los datos de referencia proceden de la base de datos EcoInvent y de la Declaración Ambiental de Producto (DAP) de baldosas de hormigón.

El pavimento desarrollado registra una huella de carbono de 97,60 kg CO₂eq/t —equivalente a 4,53 kg CO₂eq/m²—, frente a los 223,20 kg CO₂eq/t —16,04 kg CO₂eq/m²— de un pavimento convencional, lo que supone una reducción estimada superior al 70 %.

La siguiente etapa se centra en la integración del sistema piezoeléctrico en el interior del módulo constructivo. Se seleccionan y evalúan distintos tipos de dispositivos en función de su sensibilidad, robustez y capacidad de generación, analizando también su disposición óptima dentro de la baldosa y las configuraciones eléctricas que maximizan el rendimiento global del conjunto.

Finalmente, la etapa de validación en condiciones reales se materializa con la instalación de un demostrador funcional en una zona de tránsito peatonal recurrente. Durante la campaña de monitorización se evalúa la respuesta eléctrica de los dispositivos piezoeléctricos bajo diferentes condiciones de carga, con el objetivo de determinar el comportamiento energético del sistema en escenarios representativos y ajustar los parámetros de diseño para mejorar su eficiencia.

La monitorización continua del demostrador se prolongó durante un mes, registrando el voltaje generado mediante osciloscopio. Adicionalmente, se llevaron a cabo controles puntuales en cuatro escenarios: a) una persona (60 kg) caminando a paso tranquilo; b) dos personas caminando a paso tranquilo; c) una persona caminando a paso acelerado; y d) reposo sin carga (señal de referencia).

Los resultados obtenidos —energía media por activación de 115 μJ— aportan evidencia clave para confirmar la viabilidad técnica del sistema y su potencial aplicación en espacios urbanos y patrimoniales.

2.1 Desarrollo de envolvente BIPV para envolvente de edificios (CECOM4PV)

La metodología de CECOM4PV sigue un enfoque experimental dirigido al diseño, la fabricación y la validación de un sistema de cubierta cerámica con integración fotovoltaica. El proceso se ordena en fases secuenciales que abarcan desde el desarrollo del prototipo hasta su evaluación en condiciones reales.

En la primera fase se define el diseño constructivo del elemento BIPV bajo una configuración tipo sándwich, obtenida mediante el apilamiento de distintas capas funcionales, indicadas en la Tabla 2. La pieza cerámica actúa como elemento base estructural. El componente fotovoltaico se fundamenta en una celda de silicio cristalino embebida en un material encapsulante polimérico, al que se añade un encapsulante adicional entre la cara cerámica y la piel fotovoltaica para asegurar la adhesión entre ambos materiales. En una segunda fase se acomete el diseño eléctrico, analizando los puntos y tipos de conexión entre las celdas y entre los módulos constructivos.

Tabla 2. Configuración final multicapa del prototipo desarrollado en CECOM4PV

Capa	Descripción
1 exterior	Tejido de fibra de vidrio (bajo gramaje) + resina resistente UV
2	Barniz protector con protección UV

3	Célula FV flexible tipo IBC (contactos en cara trasera)
4	Tejido de fibra de vidrio + resina (por infusión al vacío)
5	Adhesivo al sustrato
6	Polvo de teja tamizado (10–20% concentración)
7 base	Sustrato cerámico (teja árabe curva)

Los principales retos técnicos abordados en el proyecto se relacionan con la adherencia de los encapsulantes poliméricos sobre superficies cerámicas rugosas y el encapsulado flexible de la célula fotovoltaica para tejas curvas. El primer reto se solventó mediante la adhesión de la piel fotovoltaica al sustrato cerámico previo imprimado epoxídico de la superficie, garantizando así la compatibilidad entre materiales. El segundo se resolvió laminando inicialmente la célula fotovoltaica en plano y adoptando células IBC flexibles, cuya integración sobre geometría curva se logró mediante un proceso de infusión al vacío con desgasificación previa para eliminar posibles burbujas.

Una vez resueltos los retos, se llevó a cabo la validación experimental en laboratorio para evaluar el comportamiento mecánico y funcional de los prototipos. Se realizan ensayos de resistencia mecánica para verificar la capacidad portante del sistema frente a las cargas propias del uso en cubierta, así como ensayos de durabilidad ante ciclos de hielo-deshielo y exposición a humedad, que permiten analizar el comportamiento del sistema ante condiciones ambientales severas.

Por último, los prototipos se instalaron en una cubierta experimental para validar su funcionamiento en condiciones reales de operación, lo que permite analizar el comportamiento energético bajo condiciones climáticas naturales, así como su integración constructiva y estabilidad frente a variaciones ambientales a lo largo del tiempo.

3 Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en los proyectos SUSTAINFLOOR y CECOM4PV evidencian el potencial de integrar tecnologías de generación energética renovable en elementos constructivos tradicionales sin comprometer los valores arquitectónicos, estéticos y patrimoniales del entorno construido. Desde una perspectiva arquitectónica, el principal avance radica en la capacidad de transformar componentes habituales de la envolvente urbana (pavimentos y cubiertas) en superficies activas energéticamente, manteniendo su apariencia convencional y su compatibilidad con contextos históricos.

3.1 Sistema de pavimento generador de energía

En el marco de SUSTAINFLOOR se ha logrado desarrollar un sistema de pavimento modular fabricado con un 80% de RCD, en línea con los principios de la economía circular.

El material resultante cumple los requisitos normativos aplicables a pavimentos de alto tránsito conforme a UNE-EN 1339, con resistencias a flexión del orden de 25-30 MPa y cargas de rotura superiores a 1300 N, lo que confirma su idoneidad para espacios públicos. El sistema presenta una reducción de peso del 36% respecto a las soluciones convencionales de hormigón, así como una disminución estimada de la huella de carbono del proceso de fabricación superior al 70%.

En cuanto al diseño, los prototipos se componen de piezas que, ensambladas, conforman la baldosa de 32 cm. En la base se alojan los dispositivos piezoeléctricos, mientras que la tapa

incorpora una zona de contacto con dichos dispositivos cuya función es activar la respuesta generadora de energía con cada pisada. La unión entre módulos se resuelve mediante un ensamble de machihembra integrado en la propia pieza.

En una versión inicial del prototipo (Figura 2a), se contemplaba el empleo de 36 elementos piezoeléctricos conectados en paralelo, con un funcionamiento correcto desde el punto de vista de la generación de energía, pero con notables limitaciones en el proceso de fabricación debido a la necesidad de conectar los elementos piezoeléctricos mediante soldadura manual. El proceso de soldadura manual daba lugar a fallos desconexión de los cables o por soldadura incompleta, lo cual se traducían en un fallo prematuro del sistema. Como evolución del sistema, se avanzó hacia el prototipo 2 (Figura 2b) introduce una geometría de sensor en forma de placa para ampliar la superficie activa, reduce el número de dispositivos a 24, distribuidos en 4 submódulos independientes, e incorpora una placa de circuito impreso (PCB) comercial modificada que conecta a los piezoeléctricos entre ellos, minimizando el cableado interior. El prototipo final constituye una versión avanzada y optimizada de estos prototipos iniciales.

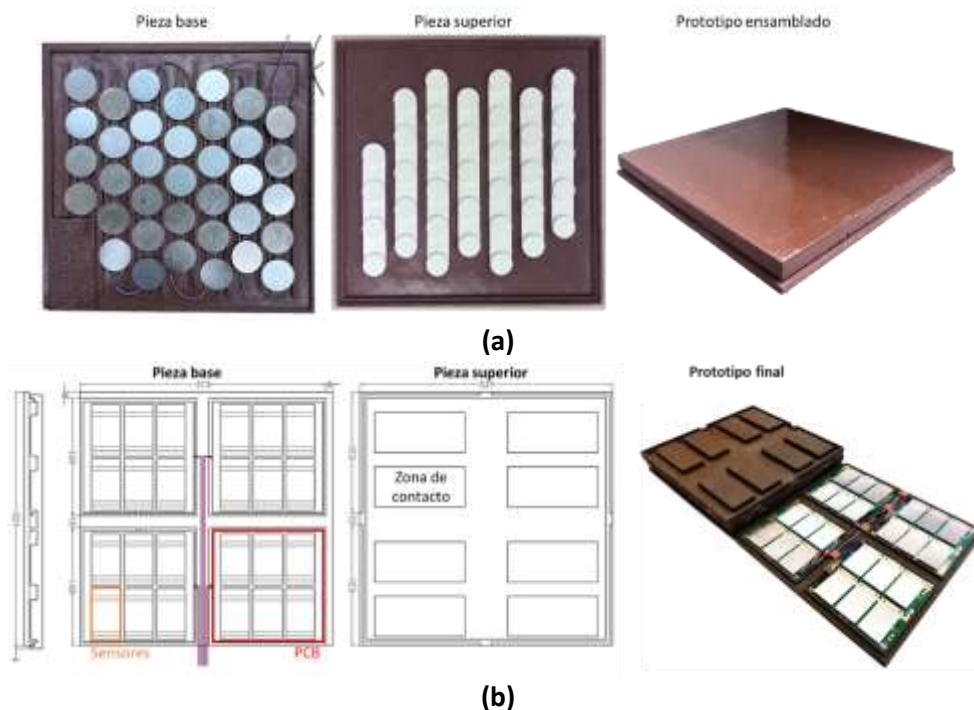


Figura 2 Prototipos iniciales del sistema de pavimento generador de energía. a) propuesta con discos piezoeléctricos conectados en paralelo mediante soldadura manual; b) propuesta con placas de piezoeléctricos conectados con PCB.

A partir del prototipo definitivo, se ha fabricado un demostrador de aproximadamente 1 m² instalado en el edificio de NOTIO (Figura 3), sobre el que se coloca una baldosa comercial para simular su integración en un entorno urbano real. Se ha monitorizado el demostrador en tiempo real para evaluar su capacidad generadora de energía.

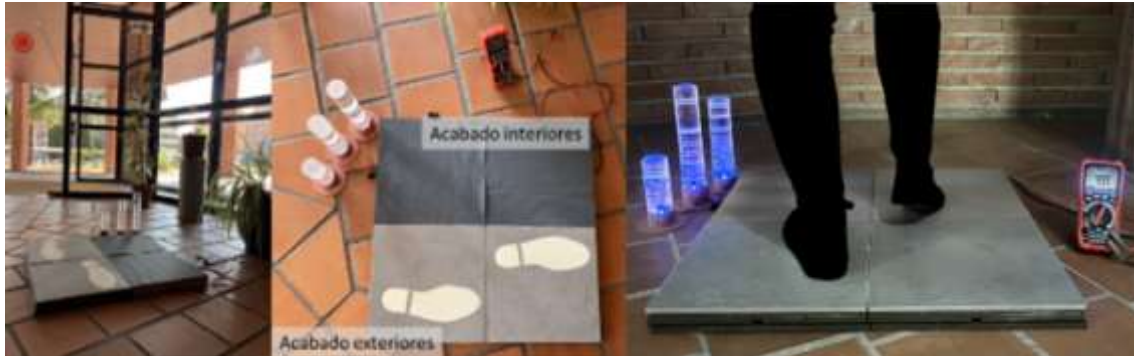


Figura 3 Montaje del demostrador del sistema de pavimento generador de energía fabricado dentro del proyecto SUSTAINFLOOR

Con los datos obtenidos en la monitorización se determina una capacidad de generar una media de 33 microculombios (μC) de carga por activación. A modo ilustrativo, un LED indicador estándar de 0,1 W consume 360 mJ por hora de funcionamiento continuo. Con la energía generada por activación (115 μJ) y 5.000 pisadas diarias por módulo (575 mJ/día), el sistema puede alimentar de forma autónoma señalización LED de baja potencia, sensores IoT u otros dispositivos de consumo intermitente en entornos urbanos con tráfico peatonal moderado.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de integrar estos módulos piezoeléctricos en aplicaciones de captación de energía en pavimentos, confirmando su capacidad para transformar la energía de las pisadas en energía eléctrica de manera efectiva.

3.2 Sistema BIPV para envolvente de edificios

En el marco del proyecto CECOM4PV se ha desarrollado un elemento de cubierta cerámica con integración fotovoltaica que respeta fielmente la geometría de la teja tradicional y busca mimetizar su cromatismo.

La fase inicial del desarrollo del prototipo consistió en validar la compatibilidad entre el material cerámico y el sistema fotovoltaico integrado. Para garantizar una adhesión adecuada del elemento fotovoltaico se diseñó un tratamiento superficial previo sobre la pieza cerámica que mejora la interfaz de unión entre materiales de naturaleza físico-química diferente. Uno de los principales desafíos técnicos fue el encapsulado de la celda, ya que su integración en la pieza cerámica exigía obtener una lámina flexible capaz de adaptarse a la geometría curva de la teja sin comprometer ni la integridad eléctrica ni la durabilidad del sistema.

Una vez resueltos estos retos (mediante la adhesión de la piel FV al sustrato cerámico, previa imprimación epoxídica y laminación en dos pasos con proceso de infusión al vacío), se procedió al diseño de las conexiones eléctricas. Como se aprecia en la Figura 4, la configuración de mayor eficiencia consiste en la interconexión de los arreglos de celdas aprovechando las aberturas de ventilación de la parte inferior del prototipo cerámico. Esta estrategia incrementa el voltaje de la unidad eléctrica y facilita la integración del cableado sin alterar el aspecto del elemento. La interconexión entre tejas puede realizarse tanto en disposición vertical (entre pieza superior e inferior) como horizontal (entre piezas contiguas), siendo esta segunda opción especialmente

recomendable habida cuenta del patrón habitual de proyección de sombras sobre faldones inclinados en el hemisferio norte, que tiende a extenderse longitudinalmente.



Figura 4 Conexión de las celdas fotovoltaicas sobre el sustrato cerámico curvo (teja cerámica)

La configuración multicapa tipo sándwich muestra una adecuada compatibilidad entre los materiales cerámicos y los componentes fotovoltaicos encapsulados, garantizando estabilidad mecánica y durabilidad ante condiciones ambientales exigentes. La caracterización eléctrica confirma el correcto funcionamiento de las celdas integradas, mientras que la monitorización en cubierta durante varios meses acredita un comportamiento energético estable en condiciones reales de operación. Además de la generación eléctrica, el diseño del sistema favorece estrategias pasivas de ventilación natural.

La validación conforme a IEC 61215 confirma que el prototipo supera la secuencia completa de ensayos UV + 50 ciclos térmicos + humedad-congelación; el sistema resulta estable ante calor húmedo incluso tras 2.000 h acumuladas y no presenta daños estructurales en el ensayo de resistencia a la heladicidad tras 100 ciclos hielo-deshielo.

La validación se completa con la instalación de un demostrador en la cubierta de un edificio para monitorizar el comportamiento en condiciones reales (Figura 5), lo que amplía el espectro de aplicación de los elementos BIPV en entornos diversos.



Figura 5 Instalación en cubierta de los elementos BIPV desarrollados con diferentes acabados superficiales.

Desde el punto de vista energético, las piezas cerámicas con acabado mimetizado presentan una eficiencia aproximadamente un 12% inferior respecto al prototipo sin tratamiento superficial. Esta diferencia se atribuye principalmente a la menor incidencia directa de radiación sobre la superficie activa. Las pérdidas de rendimiento entre verano e invierno se sitúan entre el 5-16 %, compatibles con el efecto combinado del ensuciamiento progresivo, el ángulo de incidencia desfavorable y los cambios espectrales estacionales.

El principal resultado del proyecto radica en demostrar la compatibilidad técnica entre conservación estética y producción energética, incluso asumiendo pequeñas pérdidas de eficiencia en favor de la integración arquitectónica.

4 Conclusiones

La investigación desarrollada demuestra que la integración arquitectónica de tecnologías de generación energética renovable constituye una estrategia viable para avanzar en la descarbonización del entorno urbano, incluso en contextos patrimoniales. La investigación confirma que elementos constructivos habituales, como pavimentos y cubiertas, pueden transformarse en superficies energéticamente activas manteniendo su compatibilidad estética, material y morfológica con el entorno histórico, lo que permite superar una de las principales barreras para la incorporación de energías renovables en ciudades históricamente consolidadas.

En SUSTAINFLOOR, la valorización de RCD ha permitido desarrollar pavimentos de altas prestaciones alineados con los principios de economía circular, integrando sistemas piezoeléctricos capaces de generar energía a partir del tránsito peatonal sin alterar la percepción del espacio urbano. Por su parte, CECOM4PV ha demostrado la viabilidad de integrar captación fotovoltaica en cubiertas cerámicas tradicionales mediante soluciones BIPV que respetan la geometría y el cromatismo de los materiales históricos. Aunque la adaptación estética implica una ligera reducción de la eficiencia energética, resulta asumible frente al beneficio de posibilitar la generación renovable en edificios protegidos.

En conjunto, ambos desarrollos evidencian que la producción energética puede incorporarse de forma discreta en la arquitectura mediante enfoques interdisciplinarios que combinen innovación tecnológica, sostenibilidad material y conservación patrimonial. Este cambio de paradigma abre nuevas oportunidades para avanzar hacia ciudades más sostenibles y resilientes, contribuyendo a los objetivos de neutralidad climática sin comprometer la identidad cultural del entorno construido.

5 Agradecimientos

El proyecto SUSTAINFLOOR (SBPLY_23_76300_000003) cuenta con la cofinanciación de la Unión Europea y el Gobierno de Castilla-La Mancha a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Programa FEDER 2021-2027), en el marco de la convocatoria de Ayudas a Centros Tecnológicos de la Agencia Regional de Investigación e Innovación (INNOCAM). El proyecto CECOM4PV (CPP2021-008637) ha recibido financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de la convocatoria de Proyectos en Colaboración Público-Privada 2021 de la Agencia Española de Investigación (consorcio formado por NOTIO, ISFOC, CENER y SAN JAVIER BRICKS).

6 Referencias

- [1] Comisión Europea, Dirección General de Energía. *En el punto de mira: La eficiencia energética de los edificios*. Bruselas, 17 de febrero de 2020.
- [2] A. L. Webb, Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 748-759, September 2017.
- [3] K. Fouseki and M. Cassar. Energy Efficiency in Heritage Buildings — Future Challenges and Research Needs. *The Historic Environment: Policy & Practice*, vol. 5(2), pp. 95–100. 2014. <https://doi.org/10.1179/1756750514Z.00000000058>

- [4] C.S. Polo López and F. Frontini. Energy efficiency and renewable solar energy integration in heritage historic buildings. International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, September 23-25, 2013, Freiburg, Germany. *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1493-1502, 2014.
- [5] B. I. Oluleye et al. Circular economy research on building construction and demolition waste: A review of current trends and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, vol. 357, 131927, 10 julio de 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131927>
- [6] K.K. Selim, H.M. Yehia, and D.A Saleeb. Energy Harvesting Floor Tile Using Piezoelectric Patches for Low-Power Applications. *J. Vib. Eng. Technol.* Vol. **12**, pp. 8613–8622, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42417-024-01379->
- [7] M. Khajevand-Dalasmi, RA Jafari-Talookolaei,. Experimental Investigation of Energy Harvesting from Human Walking on the Piezoelectric Flooring. *J. Vib. Eng. Technol.* Vol. **13**, pp. 544, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-02104-0>
- [8] S. Bhorge, D. Kamble, S. Kandhare, K. Sangameshwar. A Piezoelectric-Based Platform for Energy Harvesting. In: Shukla, P.K., Sharma, H., Mallipeddi, R. (eds) World Congress on Smart Computing. WCSC 2024. Studies in Smart Technologies. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9006-7_4