

## DESCARBONIZACIÓN DE ENTORNOS URBANOS MEDIANTE TECNOLOGÍAS DISRUPTIVAS DE INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA DE ENERGÍAS RENOVABLES

*R. Díaz Rubio<sup>1</sup>, C. Chirico Rodríguez<sup>1</sup>, M. Millanes Sánchez<sup>1</sup>, C. Peces Martín<sup>1</sup>, D. Sánchez Sánchez<sup>2</sup>, A. Buceta Jiménez<sup>3</sup>*

1. NOTIO - CENTRO TECNOLÓGICO ACTIVIDADES DE LA CONSTRUCCIÓN, Toledo, España

2. ISFOC, Puertollano, España

3. CENER, Pamplona, España

### RESUMEN

La transición hacia modelos energéticos más sostenibles se ha convertido en una prioridad global ante la necesidad de reducir el impacto ambiental y la dependencia de combustibles fósiles. Así, la hoja de ruta europea hacia la neutralidad climática en 2050 impone un desafío técnico sin precedentes en la intervención sobre las ciudades, especialmente en entornos de valor patrimonial, donde las soluciones de eficiencia energética convencionales resultan inviables por su impacto visual y morfológico.

Se exponen los resultados de dos líneas de investigación disruptivas, SUSTAINFLOOR y CECOM4PV, que proponen una simbiosis entre la conservación arquitectónica y la generación eléctrica renovable y descarbonizada.

SUSTAINFLOOR aborda el desarrollo de un sistema de pavimento modular piezoeléctrico diseñado para zonas de alto tránsito peatonal. La innovación técnica es doble; por un lado la formulación del material base: una matriz obtenida de la valorización de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), susceptible de fabricación por técnicas de fabricación aditiva. Por otro lado, este elemento constructivo integra, a su vez, un innovador sistema piezoeléctrico capaz de transformar la energía cinética de las pisadas en electricidad, garantizando la estabilidad de la pisada, al mismo tiempo que se mimetiza estéticamente con pavimentos históricos. Esta alternativa innovadora se convierte en una fuente energética complementaria para iluminación de plazas históricas, recorridos turísticos o zonas urbanas sensibles.

El proyecto CECOM4PV ha desarrollado un sistema de cubierta cerámica mediante una solución BIPV (Building Integrated Photovoltaics) aplicada a cubiertas tradicionales, formando un único elemento. Se desarrolla una teja cerámica curva (elemento de cobertura tradicional de edificios de Cascos Históricos) que integra captación fotovoltaica de manera innovadora, respetando estrictamente la geometría, textura y colorimetría exigidas por la normativa de conservación del patrimonio.

Los resultados evidencian que es técnicamente viable superar el reto de la descarbonización y la integración de energías renovables en entornos urbanos y edificios protegidos, ofreciendo soluciones

constructivas innovadoras que permiten avanzar hacia la descarbonización del sector sin comprometer la identidad cultural, fusionando vanguardia tecnológica con respeto patrimonial.

**PALABRAS CLAVE:** sostenibilidad, energías renovables, descarbonización, patrimonio, valorización de residuos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia modelos energéticos sostenibles constituye uno de los principales retos contemporáneos. En este contexto, el sector de la edificación y el entorno urbano representan aproximadamente el 40 % del consumo energético y 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].

La integración de energías renovables en edificios protegidos ha sido objeto de creciente investigación en la última década. Sin embargo, su implementación en contextos patrimoniales continúa enfrentando barreras asociadas a la compatibilidad estética, la reversibilidad de las intervenciones y el respeto a la materialidad histórica [3]. Polo-López y Frontini [4] presentan diferentes casos de estudio donde se ha evaluado la incorporación de elementos BIPV en edificios históricos, destacan la complejidad de establecer soluciones válidas.

En este marco, el aprovechamiento de RCD en la fabricación de pavimentos urbanos energéticamente activos representa una oportunidad, ya que se alinea con los principios de la economía circular [5]. Estudios recientes en esta temática, demuestran el interés que existe en la integración de sistemas piezoeléctricos en pavimentos para transformar la energía cinética generada por el tránsito peatonal en electricidad, configurando superficies 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.

El presente trabajo aborda el reto de compatibilizar la conservación arquitectónica con la generación energética renovable mediante el desarrollo de soluciones constructivas innovadoras aplicables a entornos urbanos y edificios históricos. Se presentan los resultados de dos líneas de investigación complementarias, desarrolladas en el marco de los proyectos SUSTAINFLOOR y CECOM4PV, que exploran, respectivamente, la activación energética del plano horizontal urbano mediante pavimentos piezoeléctricos basados en materiales procedentes de RCD, y la integración fotovoltaica en cubiertas cerámicas tradicionales mediante soluciones BIPV compatibles con la conservación patrimonial.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología se estructura en un enfoque experimental aplicado, orientado al desarrollo y validación de soluciones constructivas energéticamente activas, compatibles con entornos urbanos y patrimoniales. Se abordan dos líneas de investigación complementarias: (i) el desarrollo de pavimentos

modulares piezoeléctricos basados en residuos de construcción y demolición (SUSTAINFLOOR) y (ii) el diseño de elementos BIPV para envoltorio de edificios (CECOM4PV). En ambos casos, el proceso metodológico incluye fases de diseño conceptual, desarrollo de prototipos, caracterización experimental y validación en condiciones reales de uso.

## 2.1. Desarrollo del sistema de pavimento generador de energía

La metodología desarrollada en SUSTAINFLOOR se estructura en fases consecutivas orientadas al diseño, fabricación, validación y demostración de un sistema modular de pavimento capaz de cosechar energía mediante dispositivos piezoeléctricos integrados en una matriz material basada en RCD.

En una primera fase se aborda el diseño conceptual y constructivo de la baldosa modular (Figura 1). Se fabrica un molde específico mediante impresión 3D, que incorpora las cavidades y posicionamientos necesarios para alojar los dispositivos piezoeléctricos en ubicaciones estratégicas dentro de la pieza, buscando maximizar el número de elementos, para así mejorar la eficiencia del sistema de pavimento. Este procedimiento permite garantizar la correcta alineación de los sensores, facilitar su integración durante el proceso de fabricación y asegurar la reproducibilidad geométrica.

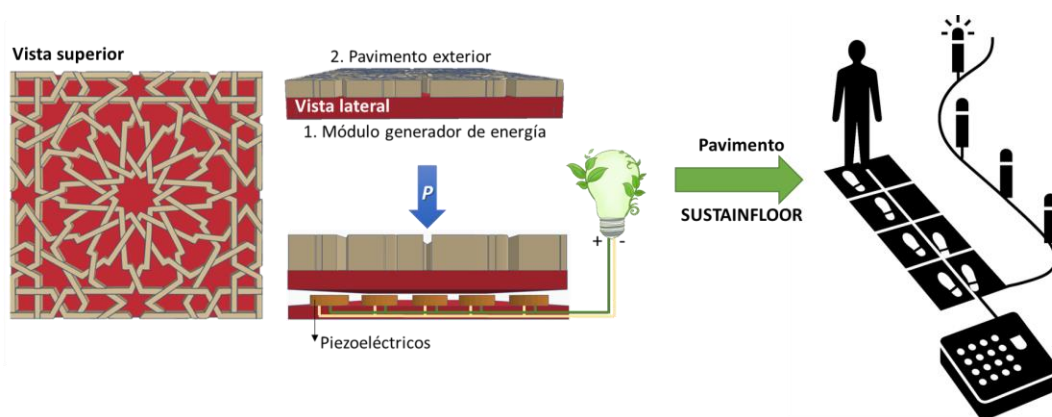
Paralelamente, se lleva a cabo el estudio de la formulación del material base utilizando RCD como componente principal. Se analizan dosificaciones y combinaciones granulométricas para obtener una mezcla que permita el conformado de la pieza sin comprometer sus prestaciones físico-mecánicas.

Los materiales RCD empleados son arcilla cocida (ladrillos y tejas), hormigón y piedra natural, componentes habituales de los RCD. Se incorporaron también en pequeñas cantidades residuos de vidrio molido (procedente de reciclaje de paneles fotovoltaicos) y polvo de acetato de vinilo de etileno (EVA) de la industria del calzado. Como aglomerante se utiliza resina orgánica.

Los residuos son caracterizados mediante ensayos de distribución de tamaño de partícula (difracción láser para fracción <math> < 63 \mu\text{m}</math> y tamizado en seco hasta 2 mm), Fluorescencia de rayos X (FRX), Análisis dilatométrico y microscopía electrónica de barrido (SEM). Tras el estudio de viabilidad, el vidrio de paneles fotovoltaicos fue descartado por baja interacción con la resina.

La formulación final de la mezcla que obtiene mejores resultados es: 75 wt.% RCD ( 37,5% Hormigón + 22,5 wt.% Piedra + 15 wt.% Cerámica) + 5% polvo EVA + 20% resina.

Los ensayos de validación se realizaron según UNE-EN 1339 para pavimentos de hormigón de exterior de alto tránsito, aplicando cargas cíclicas de 80 a 120 kg en compresión para simular el efecto de pisadas. Los resultados del prototipo frente a dichos requisitos son los que se muestran en la Tabla 1



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

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

**Tabla 1.** Principales resultados de validación

Se lleva a cabo también un análisis comparativo de la huella de carbono de producto, respecto de una baldosa de hormigón convencional. El análisis de huella de carbono, conforme a UNE-EN ISO 14067, 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 DAP (Declaración Ambiental de Producto) de baldosas de hormigón.

Se obtiene una huella de carbono de 97,60 kg CO<sub>2</sub>eq/t - 4,53 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> para del nuevo pavimento desarrollado frente a los 223,20 kg CO<sub>2</sub>eq/t - 16,04 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> de un pavimento convencional.

La siguiente fase se centra en la integración del sistema piezoeléctrico dentro del módulo constructivo. Se seleccionan distintos tipos de dispositivos piezoeléctricos en función de sus características de sensibilidad, robustez y capacidad de generación eléctrica, evaluando igualmente su disposición óptima dentro de la baldosa. Asimismo, se analizan distintas configuraciones eléctricas para optimizar el rendimiento energético del sistema global.

Finalmente, se lleva a cabo una etapa de validación en condiciones reales mediante la instalación de un demostrador funcional en zona de tránsito peatonal recurrente. Se lleva a cabo una fase de monitorización y caracterización funcional del prototipo, en la que se evalúa la respuesta eléctrica generada por los dispositivos piezoeléctricos ante diferentes condiciones de carga. Esta fase permite determinar el comportamiento energético del sistema en escenarios representativos de uso real y ajustar los parámetros de diseño para mejorar su eficiencia.

La monitorización continua del demostrador se realizó durante 1 mes, registrando el voltaje generado mediante un osciloscopio. Adicionalmente, se realizaron controles puntuales en cuatro escenarios: a) una persona (60 kg) caminando a paso lento; b) Dos personas caminando a paso lento; c) Una persona caminando a paso acelerado; c) Reposo sin peso (señal de referencia).

Los resultados obtenidos, (energía media por activación de 115  $\mu$ J) en esta fase proporcionan información clave para confirmar la viabilidad técnica del sistema y su potencial aplicación en entornos urbanos y patrimoniales.

## 2.2. Desarrollo de elemento BIPV para envoltorio de edificios

La metodología de CECOM4PV se desarrolla mediante un enfoque experimental orientado al diseño, fabricación y validación de un sistema de cubierta cerámica con integración fotovoltaica (BIPV). El proceso metodológico se estructura en varias fases secuenciales que abarcan desde el desarrollo del prototipo hasta su evaluación en condiciones reales de uso.

En una primera fase se define el diseño constructivo del elemento BIPV mediante una configuración tipo sándwich, obtenido a partir del apilamiento de diferentes capas funcionales (Figura 2). Como elemento base estructural se emplea una pieza cerámica. El componente fotovoltaico se basa en una celda de silicio cristalino, embebida en un material encapsulante polimérico. Posteriormente, se aplica un encapsulante adicional entre la superficie cerámica y la piel fotovoltaica para garantizar la adhesión entre ambos materiales. En una segunda fase se aborda el diseño eléctrico del sistema, estudiando los puntos y tipos de conexión entre las distintas celdas fotovoltaicas y entre los módulos constructivos.

Los principales retos a los que tuvo que dar respuesta el proyecto fueron la adherencia de los encapsulantes sobre superficies cerámicas rugosas y el encapsulado flexible para tejas curvas. La adherencia sobre superficies cerámicas rugosas (los encapsulantes convencionales (EVA, POE, TPO) presentaban problemas de adhesión) se resolvió mediante la adhesión de la piel FV al sustrato cerámico, previa imprimación epoxídica de la superficie para garantizar la compatibilidad.

Por su parte, el encapsulado sobre geometría curva se resolvió, laminando primero al cédula FV en plano y adoptando células IBC flexibles, que mediante un proceso de infusión al vacío con desgasificación previa permitía eliminar las posibles burbujas. La configuración final multicapa del prototipo desarrollado, es la siguiente:

- 1 (exterior) Tejido de fibra de vidrio (bajo gramaje) + resina epoxi resistente UV
- 2 Barniz protector con protección UV
- 3 Célula FV flexible tipo IBC (contactos todos en cara trasera)
- 4 Tejido de fibra de vidrio + resina epoxi (por infusión al vacío)
- 5 Adhesivo epoxi de adhesión al sustrato
- 6 (base) Sustrato cerámico (teja árabe curva; imprimado con epoxi)
- 7 Polvo de teja tamizado en matriz epoxi (10–20% concentración)

La fibra de vidrio fue seleccionada frente a carbono (sin transparencia, conductivo) y aramida (sin transparencia). El epoxi se seleccionó frente al poliéster por su alta adhesión y resistencia térmica.

Posteriormente, se lleva a cabo una fase de validación experimental en laboratorio para evaluar el comportamiento mecánico y funcional del prototipo desarrollado. Se realizan ensayos de resistencia mecánica para verificar la capacidad portante del sistema frente a cargas propias del uso en cubierta, así como ensayos de durabilidad frente a ciclos de hielo-deshielo y exposición a humedad, con el fin de analizar su comportamiento ante condiciones ambientales severas.

Finalmente, los prototipos fabricados son instalados en una cubierta experimental con el objetivo de validar su funcionamiento en condiciones reales de operación. Esta fase permite analizar el comportamiento energético del sistema bajo condiciones climáticas naturales, así como su integración constructiva, estabilidad y respuesta 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.

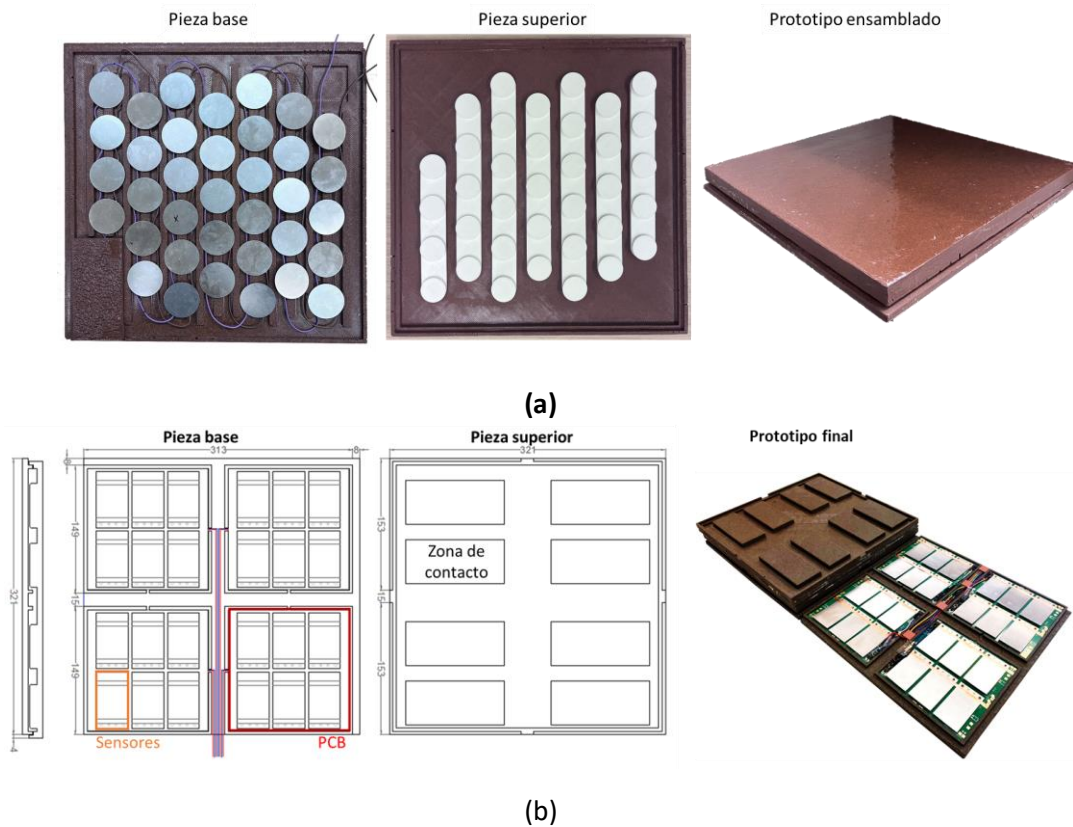
#### 3.1. Sistema de pavimento generador de energía

En el marco del proyecto SUSTAINFLOOR se logra desarrollar un sistema de pavimento modular fabricado con un 80% de RCD, alineado con las estrategias de economía circular.

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

A nivel de diseño, los prototipos desarrollados constan de piezas que, juntas, forman la baldosa de 32 cm. En la base se apoyan los dispositivos piezoeléctricos, mientras que en la tapa se incluye una zona de contacto con los piezoeléctricos cuya función es activar la respuesta generadora de energía con cada pisada. La unión entre los distintos módulos se resuelve mediante ensambles de machihembra en la pieza. En una versión inicial del prototipo, mostrada en la Figura 3a, se contemplaba el uso de 36 elementos piezoeléctricos conectados entre ellos en paralelo. Este prototipo era funcional a nivel de generación de energía, sin embargo, presentaba muchas limitaciones en el proceso de fabricación.

Como evolución del sistema, se propuso el prototipo 2, mostrado en la Figura 3b. En la nueva propuesta de baldosa se modifica la geometría de los sensores por una placa para aumentar la superficie activa para la generación de energía, reduciendo el número de sensores a 24 distribuidos en 4 submódulos generadores de energía independientes. Para limitar la necesidad de cableado en el interior de la baldosa se propone el uso de una placa de circuito impreso (PCB) comercial a la que se realizan algunas modificaciones para adaptarlo a las necesidades del proyecto.



**Figura 3.** Prototipos del sistema de pavimento generador de energía

Partiendo del prototipo final, se ha fabricado un demostrador de 1 m<sup>2</sup> aproximadamente que se ha instalado dentro del edificio de NOTIO (Figura 2) y se ha monitorizado para evaluar su capacidad generadora de energía. Sobre el sistema de pavimento desarrollado se coloca una baldosa comercial para simular su montaje en entornos urbanos.



**Figura 2.** Montaje de demostrador del sistema de pavimento generador de energía

Con los datos obtenidos en la monitorización se determina una capacidad de generar una media de 33 microculombios ( $\mu\text{C}$ ) 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  $\mu\text{J}$ ) 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.

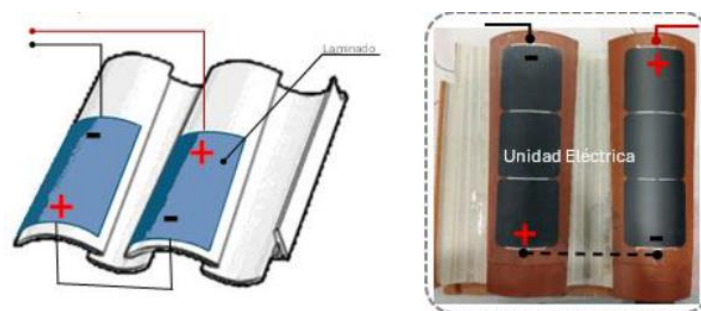
Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de integrar estos módulos piezoeléctricos en aplicaciones de captación de energía en pavimentos, confirmando su capacidad para transformar la energía de las pisadas en energía eléctrica de manera efectiva.

### 3.2. Sistema BIPV para envoltorio de edificios

En el marco de CECOM4PV se ha desarrollado un elemento de cubierta cerámica con integración fotovoltaica que respeta la geometría, y busca mimetizar el cromatismo de las tejas tradicionales.

La parte inicial del desarrollo del prototipo del elemento BIPV consiste en validar la compatibilidad del material cerámico y el sistema fotovoltaico integrado. Para garantizar la adecuada adhesión del elemento fotovoltaico se desarrolla un tratamiento superficial previo sobre la pieza cerámica, que permite mejorar la interfaz de unión entre materiales con comportamientos físico-químicos distintos. Por otra parte, una de las principales dificultades técnicas que presenta este trabajo es el encapsulado de la celda fotovoltaica, ya que para lograr su integración en la pieza cerámica es necesario obtener una lámina flexible capaz de adaptarse a la geometría curva de la teja sin comprometer 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 procede al diseño de las conexiones eléctricas. Como se muestra en la Figura 3, la configuración más eficiente consiste en la interconexión de los arreglos de celdas, aprovechando las aberturas de ventilación de la parte inferior del prototipo cerámico. Esta estrategia permite incrementar el voltaje de la unidad eléctrica y facilita la integración constructiva del cableado sin alterar la apariencia del elemento. Asimismo, la interconexión entre tejas puede realizarse tanto en disposición vertical (entre piezas superior e inferior) como horizontal (entre piezas contiguas), siendo esta última especialmente recomendable considerando la proyección habitual de sombras en cubiertas inclinadas del hemisferio norte, que tienden a extenderse longitudinalmente sobre el faldón.



**Figura 3** Conexión de las celdas fotovoltaicas sobre sustrato cerámico

La configuración multicapa tipo sándwich muestra una adecuada compatibilidad entre materiales cerámicos y componentes fotovoltaicos encapsulados, garantizando estabilidad mecánica y durabilidad frente a condiciones ambientales exigentes. La caracterización eléctrica confirma el

correcto funcionamiento de las celdas integradas, mientras que la monitorización en cubierta durante varios meses evidencia un comportamiento energético estable en condiciones reales. Además de la generación eléctrica, el diseño del sistema favorece estrategias pasivas de ventilación natural.

Los resultados de validación conforme IEC 61215 determinan que el prototipo desarrollado supera la secuencia completa UV + 50 ciclos térmicos + humedad-congelación, en cuanto al calor húmedo el sistema es estable incluso tras 2.000 h acumuladas, no presentando daños estructurales en el ensayo de resistencia a la heladicidad, tras 100 ciclos hielo-deshielo.

La validación del sistema se completa con la instalación de un demostrador en la cubierta de un edificio para monitorizar el comportamiento en condiciones reales de operación, como se puede observar en la Figura 4. Esto amplía el espectro de uso de los elementos BIPV en diferentes entornos.



**Figura 4.** Instalación en cubierta de edificio de los elementos BIPV desarrollados con diferentes acabados

Desde el punto de vista energético, se observa que las piezas cerámicas mimetizadas presentan una eficiencia aproximadamente un 12% inferior respecto al prototipo sin tratamiento superficial, debido principalmente a la menor incidencia directa de la radiación sobre la superficie activa. Las pérdidas de rendimiento entre verano e invierno se sitúan entre el 5–16%, compatibles con ensuciamiento progresivo, ángulo de incidencia desfavorable y cambios espectrales.

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

SUSTAINFLOOR (SBPLY\_23\_76300\_000003) cuenta con la cofinanciación de la Unión Europea y el Gobierno de Castilla-La Mancha (Fondo Europeo de Desarrollo Regional: Programa FEDER 2021-2027), a través de la convocatoria de Ayudas a Centros Tecnológicos, de Agencia Regional de Investigación e Innovación (INNOCAM). CECOM4PV (CPP2021-008637) cuenta con la 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.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [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-Dalamsi, 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](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9006-7_4)