

02-034 – Research proposal for the initial deployment of Lean, Agile, resilient, and sustainable solutions for building envelopes – Propuesta de investigación para el despliegue inicial de soluciones Lean, Agiles, resilientes y sostenibles para la envolvente de edificios

Ramírez-Peña, Magdalena¹; Cerezo-Narváez, Alberto¹; Otero-Mateo, Manuel¹; Bastante Ceca, María José²; Sánchez Ramos, José³

(1) Universidad de Cádiz, (2) Universitat Politècnica de València, (3) Universidad de Sevilla

Spanish  Spanish

This work aims to establish the scientific and technical foundations necessary for implementing 2D industrialized solutions for the envelopes (facades and roofs) of residential buildings. In the first phase, Lean and Agile methodologies are proposed to optimize component manufacturing and facilitate the adaptability of the solutions to different housing typologies. In parallel, a preliminary analysis of structural resilience, environmental impact, and thermal performance is conducted through pilot tests and energy modeling. This initial stage includes defining key indicators (efficiency, durability, watertightness, carbon footprint) and developing scaled prototypes to verify both the technical feasibility and the replicability of the proposal. Additionally, specific actions are planned to collaborate with industry and research centers, aiming to provide a multidisciplinary perspective that integrates expertise in materials, thermal engineering, automation, and building management. The results of this phase will raise the Technology Readiness Level (TRL) of the proposed systems, while also opening new avenues for funding through regional, national, or European calls. Consequently, the proposal serves as the initial impetus that will guide the overall roadmap of the project.

Keywords: *Industrialized construction; Building envelope; Lean methodology; Resilience; Sustainability; Thermal performance*

Este trabajo tiene como finalidad sentar las bases científicas y técnicas necesarias para la implementación de soluciones industrializadas 2D para la envolvente (fachadas y cubiertas) de edificios residenciales. En una primera fase, se plantean metodologías Lean y Agile para optimizar la fabricación de componentes y facilitar la adaptabilidad de las soluciones a distintas tipologías de vivienda. Paralelamente, se propone un análisis preliminar de la resiliencia estructural, impacto ambiental y desempeño térmico de los sistemas mediante ensayos piloto y modelizaciones energéticas. Esta etapa inicial incluye la definición de indicadores clave (eficiencia, durabilidad, estanqueidad, huella de carbono) y el establecimiento de prototipos a escala para verificar la factibilidad técnica y replicabilidad de la propuesta. Además, se contemplan acciones específicas de colaboración con la industria y centros de investigación, con el fin de dotar al proyecto de una visión multidisciplinar que integre conocimientos en materiales, ingeniería térmica, automatización y gestión de la edificación. Los resultados de esta fase permitirán elevar el nivel de madurez tecnológica (TRL) de los sistemas planteados, así como abrir nuevas vías de financiación en convocatorias autonómicas, nacionales o europeas. Así, la propuesta se convierte en el impulso inicial que guiará la hoja de ruta del proyecto en su conjunto.

Palabras claves: *Construcción industrializada; Envolvente de edificios; Metodología lean; Resiliencia; Sostenibilidad; Rendimiento térmico*



©2025 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Como en la mayoría de los sectores, la edificación se enfrenta a la necesaria actualización que requiere la rehabilitación energética de un parque edificado muchos años atrás, lo que pasa por tratarse de una medida urgente. En esta línea, varias investigaciones se han enfocado a mejorar la eficiencia energética y a la sostenibilidad en la rehabilitación de edificios. Ejemplo de ello lo encontramos en el desarrollo de estrategias basadas en integrar Lean así como digitalización en el campo de la fabricación como recurso a la optimización de procesos constructivos (Chen et al., 2024). En otros casos, se propone la incorporación de principios de sostenibilidad en etapas tempranas del diseño, tal es el caso de las metodologías BIM-Lean que demuestran mejorar de manera significativa la eficiencia de los sistemas constructivos industrializados (Ismail et al., 2023). Sin embargo, estos enfoques se centran en aplicaciones específicas como pudiera ser la gestión de recursos en la obra o la reducción de tiempo de ciclo sin abordar de manera integral los desafíos estructurales, energéticos y normativos propios de los sistemas de envolvente industrializados. Es en este contexto donde la propuesta se diferencia de las anteriores al integrar no solo Lean y Agile, sino que también principios de resiliencia y sostenibilidad combinando pruebas experimentales con modelización avanzada que asegure la viabilidad técnica y económica del sistema en condiciones reales.

Esta transformación va más allá de los modelos tradicionales buscando soluciones tanto técnicas como metodológicas que apueste por estrategias más eficientes y resilientes. Es en este contexto se valora recurrir a un componente clave como es la envolvente del edificio, entendiéndose incluido tanto la fachada como la cubierta del edificio. Puede considerarse clave principalmente por el papel que desempeña en el rendimiento energético, pero además habría que sumarle el potencial que tiene como plataforma para la industrialización de procesos constructivos.

Para dar respuesta a este desafío, se plantea la adopción de soluciones industrializadas 2D debido principalmente a la posibilidad de integrar múltiples funciones en una sola unidad de paneles técnicos y prefabricados.

Mediante este tipo de soluciones se pueden conseguir diferentes ventajas que la hacen óptima como la reducción de tiempos de ejecución, la mejora significativa de la calidad y un mayor control de todo el proceso constructivo. La Figura 1 muestra de manera resumida los desafíos en la renovación energética de edificios. Una parte importante a tener en cuenta que permita asegurar la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante la variabilidad de proyectos se basa en el soporte de metodologías de gestión adaptativas.

En este sentido, metodologías como Lean y Agile ya han demostrado ser eficaces en la optimización de procesos en otros sectores como el de desarrollo de software o fabricación y empiezan a ser explotadas en la construcción industrializada. Podrían decirse que son complementarias entre sí Lean se centra en eliminar lo que no agrega valor y Agile promueve la entrega incremental, la colaboración entre equipos multidisciplinares y la adaptabilidad (Georgakalou & Koutsikos, 2023). Proyectos donde coexisten la necesidad de respuesta rápida y la incertidumbre con objetivos de eficiencia y sostenibilidad, parece de certera aplicación la combinación de ambos enfoques conocido como "Lean-Agile" (Purohit et al., 2023).

Así de este modo se podría combinar los principios de Agile concebidos para software, al modelo de Lean Construcción y de esta manera se podría dar respuesta a las particularidades físicas del entorno, así como a la normativa y técnicas propias del sector de la construcción (Demir et al., 2012). Esta combinación de metodologías permitiría facilitar una toma de decisiones ágiles para gestionar de mejor manera la complejidad del sector de la construcción.

Figura 1. Desafíos en la Renovación Energética de Edificios.

Este artículo presenta una propuesta de investigación que sienta las bases científicas y técnicas para el despliegue inicial de soluciones 2D industrializadas en envolventes de edificios residenciales. La propuesta abarca una fase inicial donde se integran metodologías Lean y Agile para optimizar la fabricación de componentes, asegurar su adaptabilidad a distintas tipologías de vivienda, y establecer mecanismos de evaluación de resiliencia estructural, impacto ambiental y desempeño térmico. Al mismo tiempo, propone la definición de indicadores clave de rendimiento como puede ser la durabilidad, la estanqueidad, el impacto ambiental, complementados con ensayos piloto y modelizaciones, que permitan elevar la madurez tecnológica de los sistemas que se proponen al mismo tiempo que promover la viabilidad técnica y su replicabilidad.

El proyecto lleva consigo una colaboración activa entre universidad, profesionales del sector, agentes industriales, dando lugar a una estrategia de innovación en modo abierto e interdisciplinar. De este modo se pretende que la iniciativa sea entendida como el impulso inicial para trazar una hoja de ruta que esté alineada con los objetivos de digitalización del sector de la edificación así como de la descarbonización.

2. Marco Conceptual

En este apartado se pretende poner de manifiesto los principales conceptos en los que se basa el artículo, los cuales quedan recogido en la Figura 2. De una parte, Lean Construcción, basado en los principios del sistema de producción de Toyota adaptados al sector de la construcción. Estos principios buscan la mejora de la eficiencia eliminando lo que no agrega valor y maximizando el valor del cliente. Lean transforma los procesos productivos, pasando a ser procesos colaborativos, previsibles y sostenibles. Ha quedado demostrado el impacto positivo en la reducción de costes, en la mejora de la seguridad en obra y en la gestión eficiente de recursos (Chen et al., 2024). Por otra parte, la metodología Agile que nace para el desarrollo de software, ha demostrado tener principios aplicables a entornos complejos como el sector de la construcción como la capacidad de adaptación a los cambios o la mejora continua basada en las respuestas de las partes interesadas. En este contexto de construcción industrializada, Agile permite que la gestión sea flexible, se ajuste a los ciclos iterativos y a fases de experimentación técnica (Demir et al., 2012). La unión de ambas, AgiLean o Lean-Agile, se propone como evolución para proyectos en los que se requiere tanto flexibilidad como control operativo, en este caso, sería aplicable en el diseño y posteriormente en el montaje de los sistemas constructivos (Cabrita et al., 2016).

Figura 2. Marco conceptual.



El tercer concepto, Resiliencia estructural hace referencia a la capacidad del sistema constructivo para absorber impactos, mantener la funcionalidad y recuperarse tras eventos disruptivos (sísmicos, climáticos o funcionales). En el proyecto que nos ocupa, la resiliencia se mediría a través de ensayos mecánicos, simulación y modelación del comportamiento estructural ante cargas extremas y ante condiciones adversas. Si se consigue incorporar desde las etapas iniciales como sería el diseño, además de mejorar la seguridad, conseguiría alargar la vida útil del edificio. A pesar de que en el caso de envolventes 2D no se localizan demasiados estudios, sí que existen algunos en los que la resiliencia consta como pilar del enfoque LARG (*Lean, Agile, Resilient y Green*) para proyectos sostenibles y adaptativos (Cabrita et al., 2016).

La sostenibilidad en el contexto de la construcción puede tener distintas dimensiones, desde ambientales, sociales o económicas. Más concretamente en el ámbito de las envolventes prefabricadas, se puede traducir a reducción y circularidad de residuos, eficiencia energética, a incluso selección de materiales de bajo impacto. Metodologías como BIM (*Building Information Modeling*) ha demostrado ser clave para evaluar el ciclo de vida y mejorar el desempeño ambiental desde el diseño inicial (Faria et al., 2023). Además, unido a Lean permiten anticipar decisiones críticas que afectan a la sostenibilidad del proyecto, reduciendo la huella de carbono y optimizando el uso de materiales y energía (Ismail et al., 2023).

3. Metodología

Con el objetivo de validar técnica y operativamente soluciones industrializadas 2D para la envolvente de edificios residenciales, la metodología contempla tanto la generación de conocimiento técnico a través de ensayos piloto y modelizaciones, como la estructuración de procesos colaborativos haciendo uso de metodologías ágiles de gestión. La Figura 3 recoge la metodología que seguirá la investigación.

Con respecto a la parte de generación de conocimiento técnico a través de ensayos piloto y modelización, se estructurará en tres fases:

- Fase 1: Diseño metodológico y definición de variables clave. En esta etapa se seleccionan los indicadores de evaluación (*Key Performance Indicators (KPI)*), se definen los escenarios donde se va a llevar a cabo el análisis y se establecen los criterios de adaptabilidad, eficiencia y sostenibilidad que guiarán el diseño de los sistemas.

- Fase 2: Desarrollo de prototipos y validación experimental. En esta segunda fase se elaborarán soluciones 2D de fachada y cubierta a escala piloto. Estos prototipos se someterán a ensayos de laboratorio y simulaciones para evaluar su comportamiento térmico, mecánico, de estanqueidad y huella de carbono.
- Fase 3: Análisis colaborativo y escalabilidad. Es en esta tercera fase de la parte de investigación donde se implementarán talleres con agentes industriales para analizar la viabilidad técnica, operativa y normativa del sistema, así como su potencial de replicabilidad en otras tipologías edificatorias.

Figura 3. Metodología..



Para poder llevar a cabo la modelización, tanto térmica como estructural de los sistemas, se necesitará, por una parte, un software de simulación energética entre los que se valora DesignBuilder, el cuál utiliza EnergyPlus como motor de cálculo que permite modelar el consumo de energía y agua en edificios, se trata de un software gratuito, de código abierto y multiplataforma.

También serán necesarios modelos de análisis estructural mediante elementos finitos, para verificar la resiliencia de los paneles ante cargas estáticas y dinámicas, así como software para estimar el impacto ambiental en cada fase del sistema entre los que se barajan SimaPro o OneClick LCA. Todo ello en aras de potenciar la efectividad que puede conseguirse al combinar simulación con herramientas Lean y BIM para la toma de decisiones en etapas tempranas del diseño como se comentó anteriormente (Faria et al., 2023).

La parte de estructuración de procesos colaborativos, se involucrarán actores clave del sector, empresa fabricante de sistemas constructivos. Esta unión adoptará el formato de *Living Lab*, permitiendo así el intercambio continuo de información y la adaptación de soluciones según las necesidades reales del mercado en proyectos futuros. Este espacio de experimentación y colaboración entre distintas partes interesadas de un proyecto, permite mejorar la eficiencia de los procesos como la aplicabilidad de las soluciones (Ismail et al., 2023).

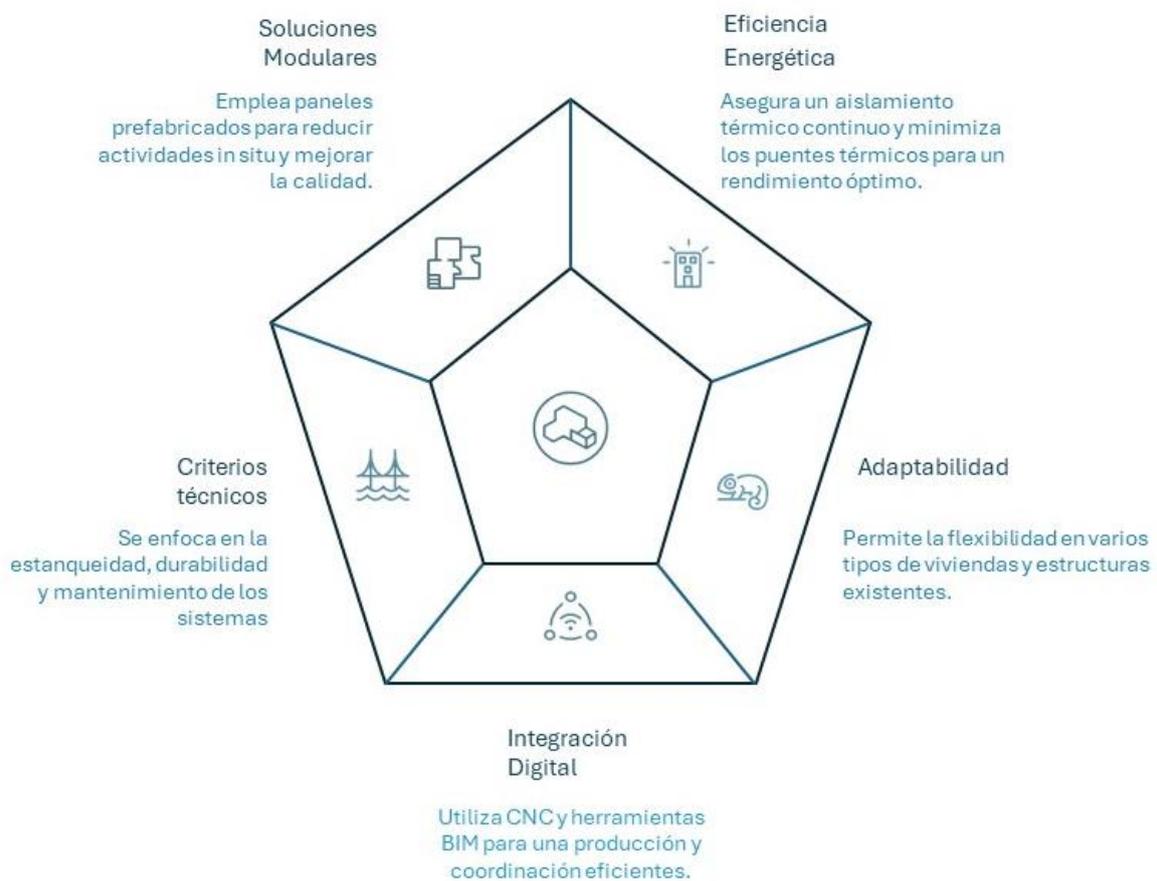
Por último, como parte del análisis de viabilidad, se realizarán pruebas piloto en entornos controlados para verificar la factibilidad técnica, constructiva y energética de las soluciones desarrolladas. Se analizarán los resultados frente a los KPI establecidos en fases previas y se elaborará un plan de escalado, incluyendo criterios de adaptabilidad a distintas tipologías edificatorias.

Este enfoque metodológico busca no solo generar conocimiento técnico, sino también elevar el nivel de madurez tecnológica (TRL) de los sistemas planteados, con el fin de prepararlos para su futura industrialización y transferencia al mercado (Chen et al., 2024).

4. Propuesta Técnica

La propuesta técnica comprende el desarrollo e implementación de sistemas industrializados 2D para la envolvente de edificios a través de la fabricación modular de paneles de fachada y cubierta que tenga una alta integración funcional y capacidad de adaptación a múltiples configuraciones como queda recogido en la Figura 4. A través de ella se busca maximizar la eficiencia en obra, reducir tiempos de ejecución, disminuir el impacto ambiental y garantizar un desempeño térmico y estructural óptimo.

Figura 4. Innovación en Construcción con Sistemas Industrializados 2D Modulares.



Para conocer el desarrollo de los sistemas, se necesita conocer la definición de los mismos considerándose como paneles prefabricados de grandes dimensiones en una única unidad y que cuente con una estructura secundaria, aislamiento térmico, barrera de vapor, acabados y elementos de fijación. Este tipo de sistema conseguiría reducir el número de actividades in situ a la vez que disminuye el número de errores de ejecución y mejora la calidad.

Con estos sistemas se consigue cumplir objetivos de sostenibilidad a la vez que con principios Lean al pretender optimizar recursos en obra y en fábrica a la vez que elimina lo que no añade valor (Spišáková & Kozlovská, 2013).

Como característica principal de los paneles, será su flexibilidad técnica y arquitectónica. Esto se traduce en la modularidad y parametrización de los paneles según las características del edificio (altura, orientación, aperturas). La capacidad de adaptación tanto a rehabilitación como a obra nueva y la compatibilidad con estructuras existentes mediante anclajes reversibles. Esta característica resulta esencial para asegurar la viabilidad comercial y la escalabilidad del sistema en diferentes contextos urbanos (Faria et al., 2023).

Con respecto a los criterios técnicos, los sistemas se diseñarán bajo un enfoque de desempeño funcional atendiendo en primer lugar a la eficiencia energética. Para cumplir con este criterio, se desarrollarán paneles con aislamiento térmico continuo, minimización de puentes térmicos y elevada inercia térmica. Se evaluará el comportamiento mediante simulaciones y ensayos in situ.

Otro criterio será la estanqueidad al agua y al aire mediante sistemas multicapa y sellos de juntas industriales que garanticen hermeticidad en condiciones reales de uso. Y el tercer criterio será la durabilidad y el mantenimiento para lo que se pretende seleccionar materiales con bajo requerimiento de mantenimiento, elevada resistencia al envejecimiento y posibilidad de recambio modular de componentes. Los tres criterios establecidos responden tanto a las exigencias del CTE (Código Técnico de Edificación) como a criterios internacionales de sostenibilidad y eficiencia operativa (Cruzado-Ramos & Brioso, 2020).

Por último, se pretende conseguir la integración con procesos productivos digitales. En este sentido, los paneles se diseñarán para ser compatibles con procesos de fabricación automatizada mediante Máquinas de Control Numérico (CNC), robotización y ensamblaje en línea de producción. De este modo se favorecerá la producción Just in Time (JIT) en planta alineándose con principios Lean (Suseelan & T., 2024), la reducción del almacenamiento intermedio y de tiempos improductivos en obra y la trazabilidad y control de calidad digital desde fábrica.

De manera complementaria se prevé el uso de herramientas BIM para coordinar el diseño, planificación y logística de los paneles, ya propuesto en experiencias Lean-BIM (Ismail et al., 2023).

A continuación se detallan en la tabla 1 recoge los KPIs necesarios para la ejecución de la propuesta.

Tabla 1: Indicadores clave de Evaluación.

Indicador	Unidad de medida	Descripción
Eficiencia Energética	kWh/m ² ·año	Demanda energética anual estimada del edificio con la envolvente 2D.
Estanqueidad al aire y al agua	n50 (h ⁻¹) / Pa (presión de filtración)	Nivel de hermeticidad al aire y resistencia a filtraciones de agua bajo presión.
Huella de Carbono	kgCO ₂ eq/m ²	Impacto ambiental total del sistema durante su ciclo de vida.
Durabilidad	Años	Vida útil estimada de los materiales y componentes del sistema.
Tiempo de Instalación	Horas/panel	Duración media necesaria para instalar cada panel en obra.
Adaptabilidad Tipológica	% de compatibilidad	Porcentaje de edificios existentes compatibles con el sistema sin grandes modificaciones.
Coste total del Ciclo de Vida	€/m ²	Suma de costes de fabricación, instalación, mantenimiento y operación a lo largo del tiempo.

5. Resultados Esperados y Viabilidad

El presente proyecto busca ser el punto de inflexión para el desarrollo, validación y escalabilidad de los sistemas de soluciones industrializadas 2D en la aplicación a la envolvente de edificios. Los resultados por su parte, busca la alineación con objetivos de mejora técnica, sostenibilidad, eficiencia operativa y generación de valor industrial.

Comenzando por el nivel de madurez tecnológica, (Technology Readiness Level – TRL), se espera conseguir un aumento del mismo a través de los sistemas propuestos. Se parte de una situación inicial TRL3-4 considerada como prueba de concepto validada en laboratorio, para llegar a meta al cierre de la fase con un TRL 6, es decir, con un prototipo validado en entorno relevante. Este salto tecnológico es fundamental para habilitar la fase de industrialización e integración en proyectos reales de rehabilitación y obra nueva (Chen et al., 2024).

Con respecto a los prototipos funcionales a escala real, se esperan conseguir dos, uno para fachada y otro para cubierta que permitan verificar ensamblajes, anclajes y medir el tiempo de instalación. También deben permitir poder realizar ensayos de comportamiento térmico, mecánico y de estanqueidad. De este modo se podrá conseguir retroalimentación de los técnicos y de los instaladores respecto al uso y replicabilidad de los sistemas.

Estos prototipos serán fundamentales para validar los KPI definidos y ajustar los procesos de diseño y de fabricación. Se prevé la validación experimental y por simulación de una reducción de $\geq 40\%$ en demanda energética en comparación a soluciones convencionales. Con respecto a la estanqueidad del aire un $n50 \leq 1.5 \text{ h}^{-1}$, muy hermético. Una huella de carbono unitaria $\leq 80 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ para un panel completo y un tiempo de instalación ≤ 2 horas/panel en condiciones estándar. Estos valores situarían la solución propuesta por encima de los mínimos regulatorios y la harían elegible para certificaciones ambientales y subvenciones de rehabilitación energética (Faria et al., 2023).

A través del análisis de costes de ciclo de vida, se espera demostrar la viabilidad económica del sistema frente a soluciones tradicionales, especialmente cuando se consideran los ahorros en tiempos de obra, eficiencia energética y mantenimiento. Además, la modularidad y adaptabilidad del sistema permitirán su replicación en un amplio rango de edificios residenciales, tanto en contexto urbano como rural. Este potencial será analizado mediante estudios de caso y escenarios de implementación con apoyo de BIM.

Se espera que los resultados técnicos y ambientales obtenidos faciliten el acceso a conseguir financiación pública de Fondos Europeos a través de programas como *NextGenerationEU*, *Horizon Europe* o LIFE. O subvenciones nacionales y autonómicas para rehabilitación energética como los programas PREE (Rehabilitación Energética de Edificios) o ayudas del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Incluso a través de la Compra pública de Innovación (CPI) por parte de administraciones interesadas en fomentar la innovación desde el sector público, a través de la adquisición de soluciones innovadoras o de soluciones en fase de desarrollo.

6. Discusión y Líneas Futuras de Investigación

La propuesta presentada desarrolla una contribución relevante en el ámbito de la innovación constructiva, al integrar en una misma solución los principios de industrialización, sostenibilidad, resiliencia y eficiencia en la gestión de proyectos. No obstante, su despliegue en entornos reales implica considerar una serie de desafíos técnicos, normativos y organizativos que marcan el camino para investigaciones futuras.

Por una parte, el impacto potencial en el sector de la edificación. La implementación de sistemas 2D industrializados puede suponer una transformación importante en el modelo tradicional de producción de envolventes, con beneficios tangibles. Por una parte, una reducción de tiempos de obra y de riesgos asociados a la ejecución en sitio. También supone una mejora en la calidad final mediante fabricación controlada y por supuesto, una contribución a objetivos de descarbonización mediante envolventes de alto rendimiento térmico y bajo impacto ambiental. Efectos que podrían extenderse a políticas públicas de rehabilitación energética y regeneración urbana con especial interés para parque edificado envejecido.

Por otra parte, el desarrollo e implementación de estos sistemas enfrenta retos significativos, hablamos de barreras técnicas y normativas. Uno de los retos es la compatibilidad normativa con el Código Técnico de Edificación (CTE) y otros reglamentos locales, especialmente en edificios existentes con geometrías no estándar. Otro de los retos es la necesidad de certificaciones técnicas como el Documento de Idoneidad Técnica (DIT) o la Evaluación Técnica Europea (ETE) para su aceptación en procesos de licitación o financiación pública. Por último, el tercer reto se enfrenta a la adaptación de procesos de obra tradicionales, que aún no están plenamente preparados para sistemas prefabricados de alta precisión. Barreras que podrían mitigarse mediante acciones paralelas de estandarización, demostración piloto y desarrollo de normativa técnica específica.

Con respecto a las futuras fases que el proyecto puede llegar a tener, se encuentran distintas líneas prioritarias de investigación y desarrollo que se derivan de esta fase. Una línea de investigación sería la escalabilidad industrial que comprende el diseño de líneas de producción automatizadas adaptadas al sistema desarrollado.

Otra línea iría encaminada a la digitalización avanzada, es decir, a la integración completa con entornos BIM y gemelos digitales para mantenimiento predictivo. El análisis de ciclo de vida extendido también comprende un campo importante donde se incluirían escenarios como desensamblaje, reciclabilidad de materiales y circularidad. Y por último la simulación urbana entendiéndose como el estudio del impacto acumulado del uso masivo del sistema en barrios o distritos completos.

Cabe mencionar también la integración del proyecto con estrategias europeas. Puede decirse que el proyecto se alinea con las estrategias europeas como el Pacto Verde Europeo, la Ola de Renovación y el marco de Taxonomía de actividades sostenibles, lo que refuerza su relevancia como herramienta para acceder a fondos estratégicos y alianzas con centros tecnológicos europeos (Wibowo & Ammar, 2025).

7. Conclusiones

Este trabajo presenta una propuesta integral de investigación para el desarrollo y validación de soluciones industrializadas 2D aplicables a la envolvente de edificios residenciales. A partir de una aproximación metodológica basada en los principios de *Lean Construction* y *Agile Project Management*, se sientan las bases para una transformación profunda de los procesos constructivos tradicionales hacia modelos más eficientes, sostenibles y resilientes.

Desde el punto de vista técnico, se plantea el diseño de paneles industrializados para fachadas y cubiertas con alto grado de integración funcional, adaptabilidad tipológica y elevado desempeño térmico, estructural y ambiental. Estos sistemas serán validados mediante prototipos a escala real y simulaciones, utilizando indicadores clave de evaluación (KPI) que permitirán demostrar su viabilidad y superioridad frente a soluciones convencionales.

En términos de gestión, se adopta un enfoque Lean-Agile que favorece la colaboración multidisciplinar, la mejora continua y la entrega incremental de resultados, alineando la propuesta con los requerimientos reales de la industria y con los objetivos estratégicos de descarbonización y digitalización del sector.

El proyecto contempla además la creación de sinergias con el ámbito empresarial y tecnológico, facilitando su escalado industrial, replicabilidad en otros entornos y acceso a financiación pública a través de programas europeos y nacionales. De este modo, la iniciativa se configura como una hoja de ruta estratégica para el despliegue futuro de soluciones de envolvente sostenibles, industrializadas y de alto rendimiento.

Como futuras líneas de desarrollo, se identifican acciones clave como la automatización de la fabricación, la integración total con entornos BIM, el análisis de ciclo de vida extendido y el estudio del impacto a escala urbana, consolidando así una plataforma tecnológica sólida para transformar el modelo constructivo actual.

8. Referencias

- Cabrita, M., Duarte, S., Carvalho, H., & Cruz-Machado, V. (2016). Integration of Lean, Agile, Resilient and Green Paradigms in a Business Model Perspective: Theoretical Foundations. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 1306–1311. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.07.704>
- Chen, Y., Qiu, D., & Chen, X. (2024). Integrating Lean Construction with Sustainable Construction: Drivers, Dilemmas and Countermeasures. *Sustainability (Switzerland)*, 16(21). <https://doi.org/10.3390/su16219387>
- Cruzado-Ramos, F., & Brioso, X. (2020). Sustainability Performance Evaluation in Building Projects by Integrating Lean and Sustainable Management Using the Delphi Method. *Proc. 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. <https://doi.org/10.24928/2020/0132>
- Demir, S., Bryde, D., Fearon, D., & Ochieng, E. (2012). *RE-CONCEPTUALISING AGILE FOR LEAN CONSTRUCTION: THE CASE FOR "AGILEAN" PROJECT MANAGEMENT*.
- Faria, P. S., Sotelino, E. D., Carmo, C. S. T. do, & Nascimento, D. L. M. (2023). Evaluating Construction Projects' Alternatives Using Lean Construction and Sustainability Principles in an Information Model Framework. *Sustainability (Switzerland)*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/su152316517>
- Georgakalou, M., & Koutsikos, K. (2023). Project management: Lean vs. Agile methodology. *International Conference on Business and Economics - Hellenic Open University*, 1(1). <https://doi.org/10.12681/icbe-hou.5312>
- Ismail, N. A. A., Hasbullah, I. S., Mohamed, M. A., Marhani, M. A., Rooshdi, R. R. R. M., Sahamir, S. R., & Golizadeh, H. (2023). Lean-BIM Collaborative Approach for Sustainable Construction Projects in Malaysia. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 33(1), 356–366. <https://doi.org/10.37934/araset.33.1.356366>
- Purohit, H., Kalra, D., Tanwar, V., & Nair, H. (2023). Rationalizing the Lean and Agile Operations to Improve Cost Efficiency: An Approach to Reliability. *International Journal of Theory of Organization and Practice (IJTOP)*. <https://doi.org/10.54489/ijtop.v3i1.237>
- Rosário Cabrita, M. do, Duarte, S., Carvalho, H., & Cruz-Machado, V. (2016). Integration of Lean, Agile, Resilient and Green Paradigms in a Business Model Perspective: Theoretical Foundations. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1306–1311. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.704>

Spišáková, M., & Kozlovská, M. (2013). Lean Production as an Innovative Approach to Construction. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 8, 87–96. <https://doi.org/10.2478/sspjce-2013-0010>

Suseelan, A., & T., S. V. (2024). Environmental Monitoring and Assessment for Sustainable Construction Projects: Leveraging Lean Techniques. *Nature Environment and Pollution Technology*. <https://doi.org/10.46488/nept.2024.v23i04.023>

Wibowo, M. A., & Ammar, M. A. (2025). Lean construction and sustainability: A review of research trends and implications for the United Nations SDGs. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560503048>

Utilización de inteligencia artificial generativa

Para la elaboración de este trabajo no ha sido utilizada la inteligencia artificial generativa.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

